



*Université Lille 2  
Droit et Santé*

**UNIVERSITE LILLE 2 DROIT ET SANTE  
FACULTE DE MEDECINE HENRI WAREMBOURG  
Année 2014**

**THESE POUR LE DIPLOME D'ETAT  
DE DOCTEUR EN MEDECINE**

**UTILISATION DU SYSTEME EOS®  
DANS LA RECHERCHE DE TROUBLES DE TORSION DES MEMBRES  
INFERIEURS CHEZ DES PATIENTS ADULTES  
SOUFFRANT D'UN PIED PLAT IDIOPATHIQUE SYMPTOMATIQUE**

**Présentée et soutenue publiquement le lundi 31 mars 2014  
Au Pole Formation  
Par Aurélie CEBULSKI-DELEBARRE**

**JURY**

<b>Présidente :</b>	<b>Madame le Professeur Anne COTTEN</b>
<b>Assesseurs :</b>	<b>Monsieur le Professeur Xavier DEMONDION Monsieur le Professeur Carlos MAYNOU</b>
<b>Directrice de Thèse :</b>	<b>Madame le Professeur Nathalie BOUTRY</b>

## **Avertissement**

**La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.**

## TABLE DES MATIERES

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>14</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>16</b>
<b>RAPPELS ET GÉNÉRALITÉS</b> .....	<b>18</b>
<b>I. LE PIED PLAT</b> .....	<b>18</b>
A. Définition et généralités .....	18
B. Étiologies des pieds plats .....	19
C. Physiopathogénie du pied plat primitif .....	20
D. Clinique .....	22
1. Circonstances de découverte - Signes fonctionnels .....	22
2. Examen clinique .....	23
a) Inspection.....	23
b) Étude des mobilités et laxités articulaires.....	25
c) Test de réductibilité .....	25
d) Tests dynamiques.....	25
3. Examen au podoscope .....	27
E. Imagerie du pied plat.....	32
1. Radiographies standards.....	32
2. Autres modalités d'imagerie .....	37
F. Traitement du pied plat primitif .....	38
a) Traitement médical .....	38
b) Traitement chirurgical.....	39
<b>II. LES TORSIONS DES MEMBRES INFÉRIEURS</b> .....	<b>40</b>
A. Torsions physiologiques des membres inférieurs.....	40
B. Anomalies de torsion des membres inférieurs .....	43
C. Techniques de mesure des torsions des membres inférieurs .....	44
D. Conséquences des torsions au cours de la marche. ....	47
<b>III. PIED PLAT PRIMITIF ET ANOMALIES DE TORSION DES MEMBRES INFÉRIEURS</b> .....	<b>49</b>
<b>IV. LE SYSTÈME EOS®</b> .....	<b>50</b>
A. Présentation .....	50
B. Principes techniques .....	51
C. Avantages .....	53
D. Inconvénients .....	55

<b>MATÉRIELS ET MÉTHODES .....</b>	<b>57</b>
I. MATÉRIELS.....	57
A. Patients .....	57
B. Sujets témoins .....	58
II. MÉTHODES .....	59
A. Radiographies.....	59
B. Système EOS® .....	59
C. Paramètres étudiés.....	63
<b>RÉSULTATS.....</b>	<b>69</b>
I. BILAN RADIOGRAPHIQUE.....	69
A. Groupe patients .....	69
B. Groupe témoins .....	70
II. BILAN EOS® .....	71
<b>DISCUSSION .....</b>	<b>74</b>
I. BUT DE L'ÉTUDE.....	74
II. MÉTHODOLOGIE.....	74
III. RÉSULTATS .....	76
IV. PERSPECTIVES : EOS® .....	78
A. Bilan du pied plat et EOS® .....	78
B. Bilan des troubles de torsion des membres inférieurs et EOS® .....	79
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>81</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>83</b>

## RÉSUMÉ

**Contexte** : Le pied plat est une pathologie fréquemment rencontrée chez l'enfant comme chez l'adulte. Majoritairement asymptomatique, il est parfois responsable d'une symptomatologie douloureuse handicapante amenant le patient à consulter pour une prise en charge spécialisée, parfois chirurgicale. Des relations éventuelles entre pied plat et troubles de torsion des membres inférieurs ont été évoquées chez l'enfant, mais jamais chez l'adulte.

**Méthodes** : Vingt-quatre patients adultes (âge médian = 40 ans) ont été inclus de manière prospective dans notre étude, de septembre 2009 à mai 2012, à l'issue d'une consultation spécialisée en orthopédie du pied au CHRU de Lille. Chaque patient bénéficiait d'un bilan radiographique centré sur le pied pathologique et d'une pangonométrie des membres inférieurs sur EOS<sup>®</sup>. Sept pieds plats unilatéraux et 17 pieds plats bilatéraux ont été étudiés, soit 31 pieds pathologiques. Ces patients ont été comparés à des sujets témoins (n = 30), appariés en âge et en sexe. Un test statistique t de Student pour comparaison entre les 2 groupes a été utilisé.

**Résultats** : Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les 2 groupes concernant les mesures de torsion des membres inférieurs : torsion fémorale (p = 0.52), torsion tibiale (p = 0.69) et rotation fémoro-tibiale (p= 0.12). De manière identique, aucune différence significative n'a été objectivée entre les 2

groupes dans le plan frontal (varus/valgus) et dans le plan sagittal (flessum/récurvatum).

**Conclusion :** Notre étude a démontré qu'il n'existait pas de relation entre pied plat symptomatique et troubles de torsion des membres inférieurs chez l'adulte.

## INTRODUCTION

Le pied plat est une pathologie fréquemment rencontrée, chez l'enfant comme chez l'adulte. Il se caractérise par la faillite des moyens d'amortissement du pied lors de la marche, ce qui conduit à un défaut de propulsion du corps, souvent aggravé par une atteinte de surmenage du tendon du muscle tibial postérieur et une rétraction des tendons du muscle triceps sural et des muscles fibulaires. Le pied plat comporte plusieurs déformations intriquées, plus ou moins sévères : affaissement de l'arche médiale du pied, valgus de l'arrière-pied, abduction et supination de l'avant-pied. Majoritairement asymptomatique, le pied plat est parfois responsable de douleurs et/ou de contractures musculaires.

Le pied plat peut être primitif ou secondaire, congénital ou acquis. Le pied plat secondaire est la conséquence d'une affection clairement identifiée (par exemple, une polyarthrite rhumatoïde responsable d'une rupture du tendon du muscle tibial postérieur). À l'inverse, le pied plat primitif demeure un mystère. Sa physiopathogénie demeure mal comprise et on ignore encore si la défaillance des moyens d'amortissement du pied est la cause ou la conséquence du pied plat primitif. Des relations éventuelles entre l'existence d'un pied plat primitif et des troubles de torsion des membres inférieurs ont été évoquées. Elles sont connues chez l'enfant (où il existe une relation entre l'existence d'un pied plat primitif et une torsion tibiale externe élevée (1)) mais, à notre connaissance, pas chez l'adulte. Ces anomalies de torsion des membres inférieurs sont souvent bien tolérées chez l'enfant mais peuvent être responsables chez l'adulte de la survenue de pathologies chroniques dégénératives diverses des hanches, des genoux et/ou des chevilles.

Le bilan d'imagerie d'un pied plat primitif repose principalement sur les radiographies en charge. Celles-ci permettent de confirmer le diagnostic clinique, d'apprécier la sévérité du pied plat et de rechercher des remaniements dégénératifs associés. Récemment est apparue une nouvelle modalité d'imagerie, appelée EOS<sup>®</sup>, permettant d'une part, de réaliser des radiographies en charge des membres inférieurs à faible dose de rayonnement et d'autre part, d'obtenir des reconstructions 3D surfaciques des membres inférieurs et des mesures plus précises, dérivées de ces reconstructions (2, 3). Le système EOS<sup>®</sup> permet donc d'étudier de manière fiable et peu irradiante les torsions des membres inférieurs.

Le but de notre travail était de rechercher, grâce au système EOS<sup>®</sup>, d'éventuels troubles de torsion des membres inférieurs chez des patients adultes souffrant de pied plat idiopathique symptomatique, en les comparant à des sujets témoins.

# RAPPELS ET GÉNÉRALITÉS

## I. LE PIED PLAT

### A. Définition et généralités

Également désigné sous les termes de « pied valgus », « pied plat valgus », « pied en pronation » ou « pied plat valgus statique », le pied plat se caractérise par la diminution, l'effacement ou l'inversion de l'arche longitudinale médiale du pied en charge. Le diagnostic de pied plat ne peut donc être retenu qu'après acquisition de la marche (en pratique, à partir de 3 ans) (4). Le pied plat est en réalité une déformation complexe, tridimensionnelle, caractérisée non seulement par une perte de l'arche longitudinale médiale dans le plan sagittal mais également par un valgus de l'arrière-pied dans le plan coronal et une abduction de l'avant-pied dans le plan transversal.

Le pied plat peut être unilatéral ou bilatéral. Il est fréquent chez l'enfant, le plus souvent résolutif au cours de la croissance, et la déformation ne subsiste, selon les séries, que chez 1 à 3% des adultes (4). À la naissance, il existe en effet un pied plat physiologique puis à partir de 3-4 ans et durant les dix premières années de la vie, le pied se creuse et la voûte plantaire se développe sous l'influence de la marche. Entre 4 et 5 ans, 75% des pieds sont plats contre 12,5% entre 8 et 13 ans (5). Il ne reste donc que très peu de pieds plats en fin de croissance. C'est uniquement lorsque la déformation persiste à l'adolescence ou à l'âge adulte que le pied plat est considéré comme anormal.

## **B. Étiologies des pieds plats**

La majorité des pieds plats est d'origine statique, c'est-à-dire primitive (ou idiopathique). Aucune cause médicale ou chirurgicale n'est clairement identifiée. Le pied plat primitif est fréquemment bilatéral, souple, peu symptomatique et connu depuis l'enfance. Plus rarement, le pied plat peut s'intégrer dans diverses pathologies (cf. tableau 1).

Constitutionnel, il peut être secondaire à (6-8):

- une synostose calcanéonaviculaire (50-60%) ou talocalcanéenne (30-40%),
- une hypercorrection d'un pied bot,
- un pied talus ou convexe,
- des affections congénitales du tissu conjonctif (syndrome de Marfan, syndrome d'Ehlers-Danlos ou chromosome X fragile...).

Acquis, le pied plat peut être secondaire à :

- un dysfonctionnement du tendon du muscle tibial postérieur (rupture, déficit fonctionnel des structures capsulo-ligamentaires médiales notamment chez l'adulte obèse),
- une polyarthrite rhumatoïde,
- un traumatisme (fracture du calcaneus, fracture-luxation de Lisfranc ...),
- une ostéoarthropathie nerveuse (pied diabétique, Charcot ...),
- des désordres neuro-musculaires (myopathies, neuropathies centrales ou périphériques),
- des séquelles de pied bot varus équin
- des tumeurs du pied.

EXEMPLES DE CAUSES SECONDAIRES DU PIED PLAT	
<b>Déformations congénitales</b>	Synostose (talo-calcanéenne le plus souvent, parfois calcanéo-naviculaire)
	Pied talus
	Pied convexe
	Hypercorrection chirurgicale du pied bot varus équin
<b>Maladies du collagène</b>	Syndrome d'Ehlers-Danlos
	Syndrome du X fragile
<b>Maladies neurologiques</b>	Poliomyélite
	Spasticité (toute lésion du motoneurone central)
	Myopathie
	Spina bifida
	Pied de Charcot
<b>Affections rhumatismales</b>	Polyarthrite rhumatoïde
	Arthrose avec effondrement secondaire de l'arche par destruction ligamentaire
<b>Lésions traumatiques</b>	Fracture du calcanéum (horizontalisation)
	Fracture-luxation de Lisfranc (tarso-métatarsienne)
	Luxation de Chopart (médiotarsienne)

Tableau 1: Exemples de causes secondaires du pied plat.

### C. Physiopathogénie du pied plat primitif

Chez un sujet normal au repos en station debout unipodale, l'arche longitudinale médiale du pied forme une ligne maintenue par les éléments statiques de l'arrière et de l'avant-pied. La conformation du pied est ainsi maintenue par des éléments postérieurs (pilier talo-calcanéen) et antérieurs (os naviculaire, cuboïde, cunéiformes, deuxième et troisième métatarsiens) unis par leurs articulations, capsules et ligaments ainsi que par l'aponévrose plantaire (4). Expérimentalement (par sections progressives sur pieds de cadavres des éléments plantaires de soutien), il apparaît que les facteurs de stabilité sont constitués de l'aponévrose plantaire et des ligaments talo-naviculaires et calcanéo-naviculaires (= spring

ligament) (9-11). L'aponévrose plantaire, en continuité distalement avec l'hallux, a pour effet lors de la mise en tension, d'augmenter la hauteur de l'arche médiale.

La physiopathogénie exacte du pied plat primitif demeure encore incertaine. L'hérédité interviendrait car de nombreux patients ont des antécédents familiaux de pieds plats. Le pied plat primitif serait dû à une déficience musculaire du pied qui empêcherait le développement normal de la voûte plantaire; cependant on ne peut préciser avec certitude s'il s'agit de la cause (lésion traumatique initiale) ou de sa conséquence (étirement dégénératif progressif) (4, 5, 12).

Divers éléments sembleraient contribuer au développement d'un pied plat statique (4) :

- une faillite mécanique des éléments capsulo-ligamentaires et aponévrotiques qui maintiennent normalement l'arche longitudinale médiale du pied, c'est à dire l'aponévrose plantaire (principal élément de soutien) et les ligaments talo-naviculaires et calcanéο-naviculaires (spring ligament). On constate d'ailleurs souvent une hypotonie diffuse avec hyperlaxité articulaire, genu valgum, hypercyphose dorsale et obésité.

- une atteinte des structures musculotendineuses qui contribuent normalement au maintien de la cambrure. On peut notamment observer des anomalies de l'insertion naviculaire du muscle tibial postérieur, une insertion anormalement antérieure du tendon du muscle tibial antérieur sur le premier métatarsien, la présence d'un muscle troisième fibulaire, un tendon calcanéen court, une hypotonie des muscles varisants extrinsèques du pied (tibial postérieur, fléchisseur propre de l'hallux) et une hypertonie des muscles éverseurs (court et long fibulaires latéraux).

- un déséquilibre ostéoarticulaire au premier rang duquel apparaît le valgus de l'arrière-pied.

Le pied plat peut débuter soit au niveau de l'articulation cunéométatarsienne ou naviculocunéenne avec une hypermobilité dorsale du premier métatarsien, soit au niveau tibiotarsien suite à une lésion ligamentaire médiale. Le pied est alors déséquilibré lors du déroulement du pas avec un appui médialisé qui aggrave la déformation : le valgus de l'arrière-pied est aggravé par la supination de l'avant-pied, l'abduction s'aggrave par l'appui médial sur le premier métatarsien et un hallux valgus se constitue par un appui médial sur l'hallux.

## **D. Clinique**

### **1. Circonstances de découverte - Signes fonctionnels**

Bon nombre de patients ayant un pied plat demeurent asymptomatiques. Cependant, le pied plat peut être responsable de douleurs, symptôme le plus fréquent (13). Les douleurs sont préférentiellement médiales, rétro- et sous-malléolaires, et seraient liées à la mise en tension des structures capsulo-ligamentaires du pied principalement en rapport avec une atteinte du muscle tibial postérieur : tendinopathie, tendinite d'insertion, ténosynovite ou même rupture (4, 13). Lorsque la déformation est très prononcée, les douleurs médiales peuvent également être liées à un conflit entre la chaussure et la saillie sous-cutanée du naviculaire ou de la tête du talus (14). Les douleurs latérales sont plus fréquemment rencontrées en cas de pieds plats très évolués, quand le valgus de l'arrière-pied génère un conflit entre la malléole fibulaire et le processus latéral du talus et une souffrance du sinus du tarse. Une boiterie, un excès d'usure de la chaussure, une gêne au chaussage, une fatigabilité et une instabilité à la marche ou un aspect inesthétique du pied sont d'autres motifs de consultation.

Chez l'adolescent ou le jeune adulte porteur d'un pied plat, l'apparition de douleurs à la course ou à la marche peut être en rapport avec une anomalie à l'insertion naviculaire du muscle tibial postérieur. Une synostose de l'arrière-pied ou du médio-pied (calcanéo-naviculaire, talocalcanéenne, talonaviculaire....) devra également être recherchée car les synostoses deviennent bruyantes au moment de leur ossification, se manifestant par une limitation de la mobilité ; on parlera ainsi de "pied plat valgus contracturé" (4).

## **2. Examen clinique (12) :**

Le diagnostic de pied plat est avant tout clinique. Il permet de définir les zones anatomiques lésées et leur réductibilité. Il a également pour but de détecter des causes possibles au pied plat, et permet donc de différencier un pied plat primitif d'un pied plat secondaire. L'anamnèse s'intéresse aux thérapeutiques antérieures et aux répercussions quotidiennes du pied plat.

### ***a) Inspection***

Elle débute par un examen pied chaussé afin d'apprécier une usure médiale des semelles et le port éventuel d'une semelle orthopédique. Un examen rigoureux effectué secondairement pieds nus, en position debout et en charge, permet d'apprécier les trois principales composantes du pied plat valgus : l'effondrement de la voûte plantaire longitudinale, l'abduction de l'avant-pied et le valgus de l'arrière-pied (cf. figure 1).

- *L'effondrement de l'arche médiale* montre un bord médial du pied venant au contact du sol dans sa partie médiane.

- *L'abduction de l'avant-pied* par rapport à l'arrière-pied se traduit par une cassure de l'axe tarso-métatarsophalangien avec un allongement relatif du bord médial du pied par rapport au bord latéral.
- *Le valgus de l'arrière-pied* (ou valgus calcanéen).

L'abduction de l'avant-pied et le valgus calcanéen sont responsables d'un signe clinique dénommé « too many toes sign » (15) : le clinicien, situé derrière le patient ayant un pied plat, visualise un trop grand nombre d'orteils latéraux, par comparaison à un sujet normal.

On recherche également une possible saillie médiale de la tête du talus et de la tubérosité de l'os naviculaire par une vue de profil médial ; cette saillie réalisant une double voire triple malléole médiale. Parfois la contraction intermittente du muscle tibial antérieur est visualisée, luttant contre ou aggravant l'affaissement plantaire (4). Un éventuel hallux valgus sera recherché car souvent associé en raison de l'allongement progressif de l'arche interne, de la faillite capsulo-ligamentaire et de la transmission préférentielle des contraintes sur le bord médial du pied.



**Figure 1: Examen clinique (8, 12)**

**1 : Signe du *too many toes* lié au valgus calcanéen et à l'abduction de l'avant-pied. 2 : Abduction de l'avant-pied. 3 : Effondrement de la voute plantaire.**

### **b) Étude des mobilités et laxités articulaires**

Un examen minutieux recherche des douleurs à la palpation du tendon du muscle tibial postérieur et du sinus du tarse et dépiste une éventuelle contracture des muscles fibulaires. La mobilité et la laxité articulaires sont mesurées systématiquement au niveau des articulations tibio-tarsienne, sous-taliennne, talonaviculaire, première cunéométatarsienne et naviculocunéenne. Une limitation de la mobilité des articulations sous-taliennes et médiotarsiennes devra faire évoquer l'existence d'une synostose du tarse.

### **c) Test de réductibilité**

L'examen clinique apprécie la réductibilité éventuelle d'un pied plat pour différencier un pied plat souple d'un pied plat rigide. Le caractère souple signifie que le pied plat est réductible à l'examen clinique. La réductibilité de la déformation est recherchée passivement par la mise en décharge du pied pendant dans le vide, qui doit faire disparaître totalement ou partiellement le plat et le valgus (4). Le test de réductibilité se fait également en corrigeant le valgus par une main, l'abduction par l'autre main puis la supination du 1er rayon par le pouce de la main distale (12).

### **d) Tests dynamiques**

Les tests dynamiques n'ont un intérêt que pour les pieds plats réductibles. Ils permettent de réduire le pied plat en reformant la voûte plantaire et en réduisant le valgus calcanéen (cf. figure 2) (12):

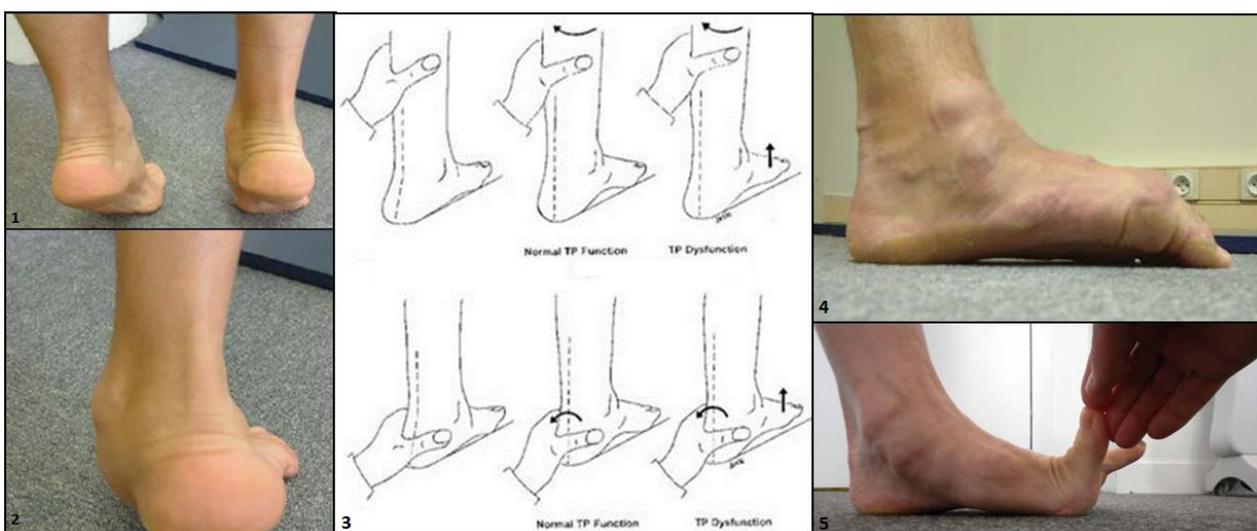
- La pointe des pieds. Lors de la mise sur la pointe des pieds en bipodal, le pied se met normalement en inversion. Si le pied part en éversion ou si le test est impossible, il s'agit d'un dysfonctionnement du couple de torsion (raideur ou laxité).

Si le pied présente une inversion normale en bipodal mais reste en éversion en station monopodale, cela témoigne d'une dysfonction du tendon tibial postérieur ou du spring ligament (16).

- Test de Hintermann (17). Il consiste à réduire le valgus de l'arrière-pied en réalisant une mise en rotation externe de la jambe, pied en charge, et à analyser la correction ou non de la supination de l'avant-pied visualisée par l'appui de la tête du premier métatarsien au sol.

- Test de Jack. Il analyse le creusement de l'arche médiale du pied et la correction du valgus de l'arrière-pied par la flexion dorsale passive de l'hallux.

On parlera de pied plat rigide lorsque ce dernier n'est pas réductible lors des manœuvres précédentes ; un pied plat rigide implique de rechercher minutieusement des anomalies osseuses (synostoses). Une fois le valgus calcanéen réduit, il faut évaluer la supination compensatrice de l'avant-pied qui peut être réductible ou fixée. Si la supination n'est réductible qu'en flexion du genou, cela témoigne d'une rétraction du tendon calcanéen qu'il faudra traiter en conséquence.



**Figure 2: Tests dynamiques (12)**

**1-2 : Analyse de la capacité de verrouillage du couple de torsion et test du tendon tibial postérieur et spring ligament en station unipodale. 3-4 : Test de Hintermann. 5 : Jack-test montrant la réductibilité de l'affaissement de l'arche médiale par le mécanisme de treuil.**

### 3. Examen au podoscope

L'examen clinique se poursuit par une étude du pied en position debout sur podoscope. L'assise plantaire de référence (cf. figure 3) montre l'empreinte du talon postérieur ovoïde car l'appui y est plus marqué (18). L'isthme est la zone d'appui du médiopied (arche latérale). Le bord externe est légèrement concave en dehors, sa largeur représente environ le tiers de la largeur de la zone d'appui de l'avant-pied (19). La zone d'appui située sous les articulations métatarso-phalangiennes est la plus large (bande métatarsienne ou talon antérieur). Les pulpes des orteils ont toutes une zone d'appui ovale, à distance et en avant de la bande métatarsienne.



Figure 3: Examen podoscopique normal, vue supérieure et inférieure (18).

Dans le pied plat, l'empreinte plantaire montrera peu ou pas de courbure du bord interne. Selon l'importance de l'augmentation de la surface d'appui, on distingue 3 stades de pied plat (cf. figure 4 - tableau 2) :

- 1<sup>er</sup> degré : l'isthme est supérieur au tiers de la palette métatarsienne, mais reste concave en dedans.
- 2<sup>ème</sup> degré : l'isthme globalement aussi large que la palette métatarsienne.
- 3<sup>ème</sup> degré : l'isthme est supérieur à la palette métatarsienne et réalise alors un bord interne convexe.

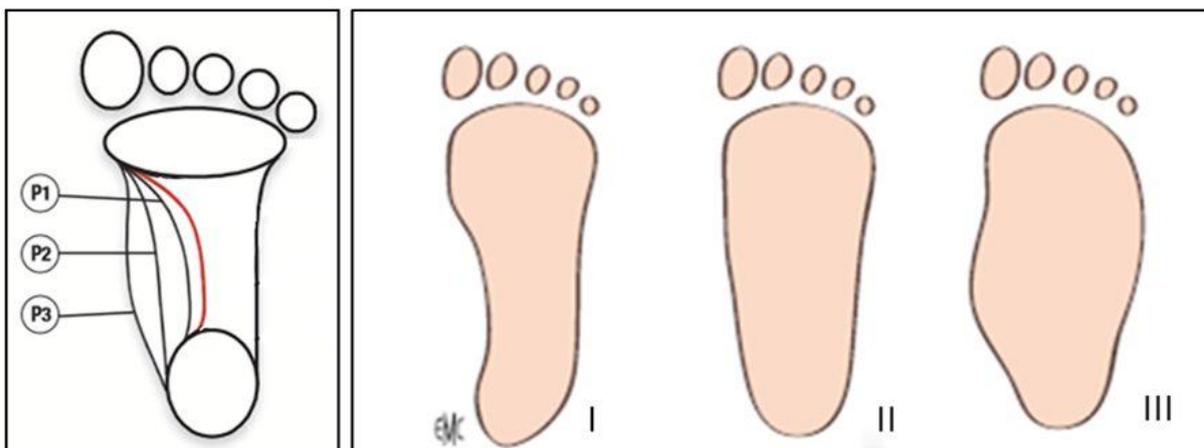


Figure 4: Empreinte plantaire au podoscope du pied plat, P1= 1<sup>er</sup> degré, P2= 2<sup>ème</sup> degré, P3=3<sup>ème</sup> degré (8).

GRADATION DE L'EMPREINTE PLANTAIRE DU PIED PLAT SUR PODOSCOPE	
<b>Degré 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1/3 &lt; bande latérale &lt; 2/3 de la bande métatarsienne</li> <li>- Léger valgus calcanéen</li> <li>- Saillie de la tubérosité naviculaire</li> <li>- Légère diminution de la hauteur de la voûte médiale</li> </ul>
<b>Degré 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2/3 &lt; bande latérale &lt; à l'ensemble de l'empreinte</li> <li>- Chute de la tête du talus et du naviculaire</li> <li>- Valgus calcanéen &gt; 15°</li> </ul>
<b>Degré 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bande latérale = bande métatarsienne : contact entier de la plante avec le sol</li> <li>- Convexité angulaire à sommet naviculaire du bord médial de l'empreinte</li> <li>- Angulation concave du bord latéral du pied par abduction marquée du tarse antérieur</li> </ul>

Tableau 2: Gradation de l'empreinte plantaire du pied plat sur podoscope.

L'examen clinique se termine par une évaluation du pas clinique qui recherchera une ouverture de l'angle du pas et une perte de propulsion avec réduction de l'élévation talonnière et valgus de l'arrière-pied (cf. figure 5). Lors de la marche, il existe un défaut d'appui sur la colonne latérale du pied et un déséquilibre musculaire au profit des fibulaires ainsi qu'une hypermobilité dorsale du premier rayon.

Enfin une étude dynamique par étude baropodométrie terminera l'examen clinique. Elle permettra une analyse de l'intensité et de la répartition des pressions du pied lors de la marche. Les données recueillies par ordinateur comportent l'empreinte du pas (synthèse du déroulement du pas) et la courbe d'index de force antéro-médiale en fonction du temps (20). Cette courbe a un intérêt particulier, montrant le défaut de verrouillage du pied au cours du pas avec une pression répartie principalement sur la partie médiale du pied (cf. figures 6, 7 et 8).



Figure 5 : Étude dynamique (21) A : Enregistrement des données via la plateforme de marche, B : Valgus de l'arrière-pied, C : Dysfonction du tibial postérieur, D : Aspect normal.

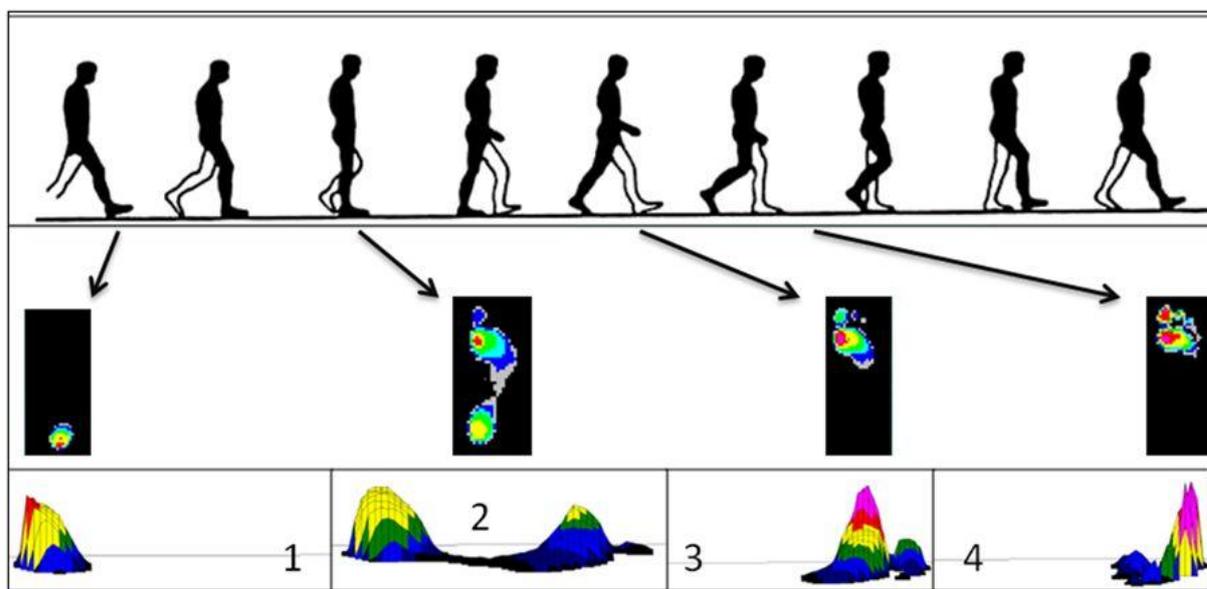


Figure 6 : Baropodométrie dynamique normale en phase d'appui (21) :  
 1= Attaque du talon, 2= Phase plantigrade, 3= Lever du talon, 4= Propulsion.

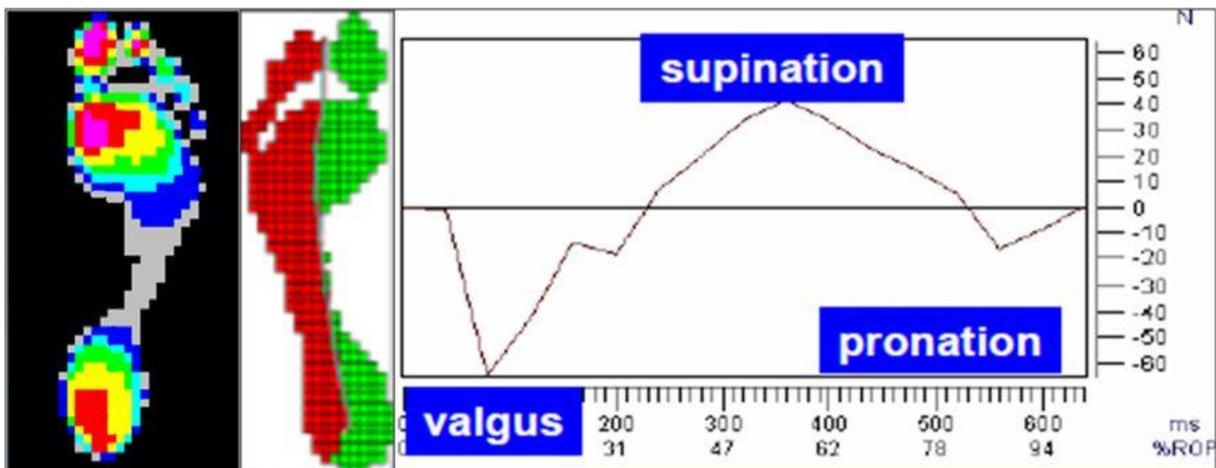


Figure 7: Profil baropodométrique normal ; courbe d'index de force latéro-médiale normale (21).

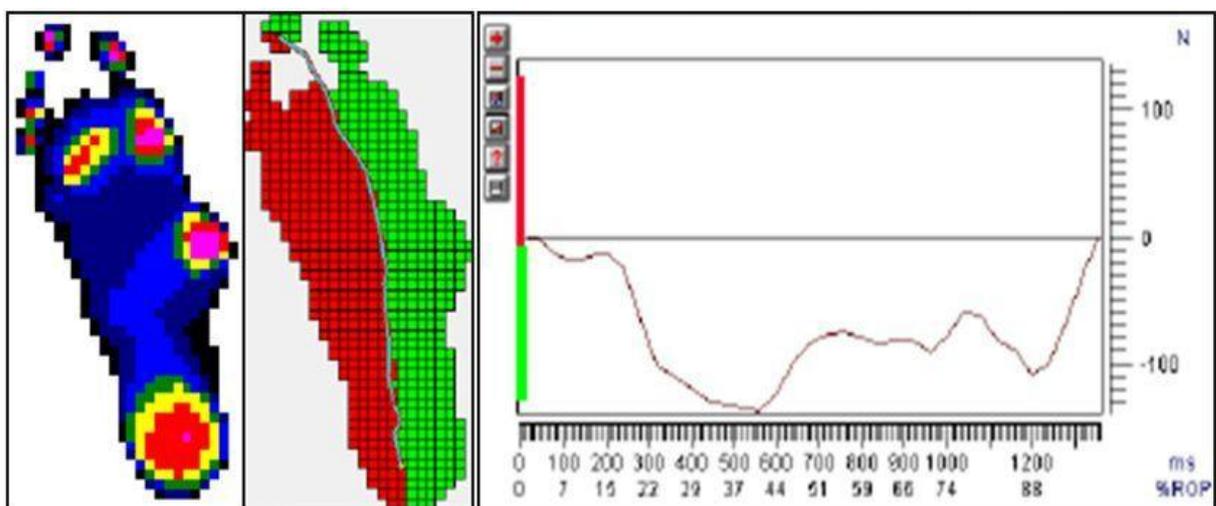


Figure 8 : Profil baropodométrique du pied plat : la courbe d'index de force latéro-médiale montre le défaut de verrouillage du pied au cours du pas avec une pression répartie principalement sur la partie médiale du pied (20).

L'ensemble des informations collectées lors de l'examen clinique permettra de classer le pied plat dans l'un des quatre stades de Bluman (22) (cf. tableau 3) et d'orienter le traitement :

- *Stade I, ou atteinte du tendon du muscle tibial postérieur* : inflammation du paratendon ou rupture partielle du tendon tibial postérieur, avec peu ou pas de déformation du pied.

- *Stade II, ou pied plat valgus réductible* : déformation en pied plat évidente avec faiblesse de l'inversion du pied et impossibilité à la montée unipodale sur la pointe du pied. Mise en évidence d'une atténuation de l'arche médiale et d'un valgus de l'arrière-pied. Ce stade est subdivisé en 3 catégories selon que l'élément dominant est le valgus calcanéen (type IIA), l'abduction de l'avant-pied (type IIB) ou l'instabilité du premier rayon (type IIC).
- *Stade III, avec un pied plat fixé (valgus calcanéen fixé).*
- *Stade IV, signant une atteinte de l'articulation tibio-talaire.* Dans les pieds plats évolués, l'évolution se fait vers une insuffisance du ligament deltoïde et une instabilité médiale de l'articulation tibio-talaire avec déformation articulaire en valgus. Le stade IV est de type A lorsque les valgus calcanéen et tibio-talaire sont isolés et de type B lorsque s'associent des lésions arthrosiques.

CLASSIFICATION DE BLUMAN	
<b>Stade I</b>	<b>Ténosynovite du tibial postérieur sans déformation</b>
<b>Stade II</b>	<b>Rupture du tendon tibial postérieur et pied plat souple.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>type IIA : valgus calcanéen dominant</i></li> <li>- <i>type IIB : prédominance de l'abduction de l'avant-pied</i></li> <li>- <i>type IIC : instabilité du premier rayon</i></li> </ul>
<b>Stade III</b>	<b>Valgus calcanéen fixé</b>
<b>Stade IV</b>	<b>Valgus tibio-talaire</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>type IVA : laxité</i></li> <li>- <i>type IVB : arthrose</i></li> </ul>

**Tableau 3 : Classification des pieds plats selon Bluman.**

## **E. Imagerie du pied plat (6)**

Ce bilan repose principalement sur les radiographies en charge. Elles permettront dans un premier temps de confirmer le diagnostic mais aussi d'en quantifier l'importance. Elles permettront également d'évaluer l'importance des différents troubles de la statique du pied dans les 3 plans de l'espace. Le scanner, l'IRM, et l'échographie seront réalisés pour des indications bien plus limitées. (23)

### **1. Radiographies standards**

Le bilan radiographique comporte au moins 4 incidences, parfois complétées d'incidences réalisées après correction du trouble statique par talonnette ou de clichés dynamiques (23) :

- pied de profil en charge ;
- incidence dorso-plantaire en charge ;
- incidence de Méary ;
- pied déroulé (3/4 interne).

### **PIED DE PROFIL EN CHARGE**

Ce cliché permettra de rechercher trois types d'anomalies (cf. figure 9 ) (23):

- Effondrement de l'arche longitudinale médiale du pied qui se traduit par :
  - une augmentation de l'angle de Djian-Annonier. Cet angle est compris entre la droite unissant la partie déclive du calcanéum à la partie déclive de l'articulation talonaviculaire et la droite passant par ce dernier et la partie déclive du sésamoïde médial. Cet angle est normalement de 120 à 130°. Il est supérieur à 130° dans le pied plat.

- une cassure de l'angle de Méary-Toméno: perte de la continuité entre l'axe du talus et l'axe du 1<sup>er</sup> métatarsien. Le pied plat entraîne une cassure de cette droite au niveau de l'articulation talo-naviculaire, parfois plus distalement (cunéo-naviculaire, cunéo-métatarsien).
- une projection antérieure de l'interligne talonaviculaire par rapport à l'interligne calcanéo-cuboïdien. Normalement, ces interlignes se superposent sur un pied de profil normal.
- les pentes du calcaneus et du 1<sup>er</sup> métatarsien : diminuées dans le pied plat.
  - Divergence talo-calcanéenne majorée : l'angle de divergence est évalué par l'axe prolongé du talus croisant celui du calcaneus, l'ensemble formant un angle de 30-50°, qui augmente en cas d'équinisme du pied avec verticalisation du talus.
  - Équinisme souvent associé. Il correspond à une augmentation de l'angle entre l'axe du talus et celui du tibia, responsable d'une verticalisation du talus. Il est normalement de 105 à 110°.
  - Synostose éventuelle. Il s'agit surtout de la synostose talo-calcanéenne, la synostose calcanéo-naviculaire étant moins bien analysée sur cette incidence de profil, par comparaison au cliché de ¾.

L'excès d'appui antéro-médial se traduit par ailleurs indirectement par une supination de l'avant-pied avec superposition des os naviculaire et cuboïde, et par une frontalisation de la pince bimalléolaire par avancée de la malléole fibulaire. Des remaniements dégénératifs, en particulier des interlignes tibio-talaire et talo-naviculaire peuvent être observés, de même qu'une dysmorphie du talus (allongement, aplatissement).



Figure 9 : La radiographie de profil montre l'effondrement de la voûte plantaire par augmentation de l'angle de Djian (4), une cassure de la ligne de Méary-Toméno (5), et un angle de divergence talo-calcanéen augmenté en cas d'équinisme associé (6) comparativement à un pied normal (1-2-3).

### **RADIOGRAPHIE DORSO-PLANTAIRE EN CHARGE EN INCIDENCE BIFOCALE**

Cette technique de double exposition permet d'avoir, sur la même radiographie, l'avant et l'arrière pied (cf. figure 10). Elle permet notamment la mesure de :

- la divergence talo-calcanéenne. Elle correspond à l'angle entre l'axe du talus et le bord latéral du calcaneum, normalement compris entre 15-25°. Elle est augmentée dans le pied plat.
- l'abduction de l'avant-pied par une augmentation de l'angle talo-métatarsien (angle défini par l'axe du talus et celui du 2<sup>ème</sup> métatarsien) normalement compris entre 6 et 42°.
- la perte de l'alignement de la colonne latérale avec apparition d'un angle entre le bord latéral du talus et le bord latéral du 5<sup>ème</sup> métatarsien. Cette perte d'alignement témoigne également de l'abduction de la palette métatarsienne.

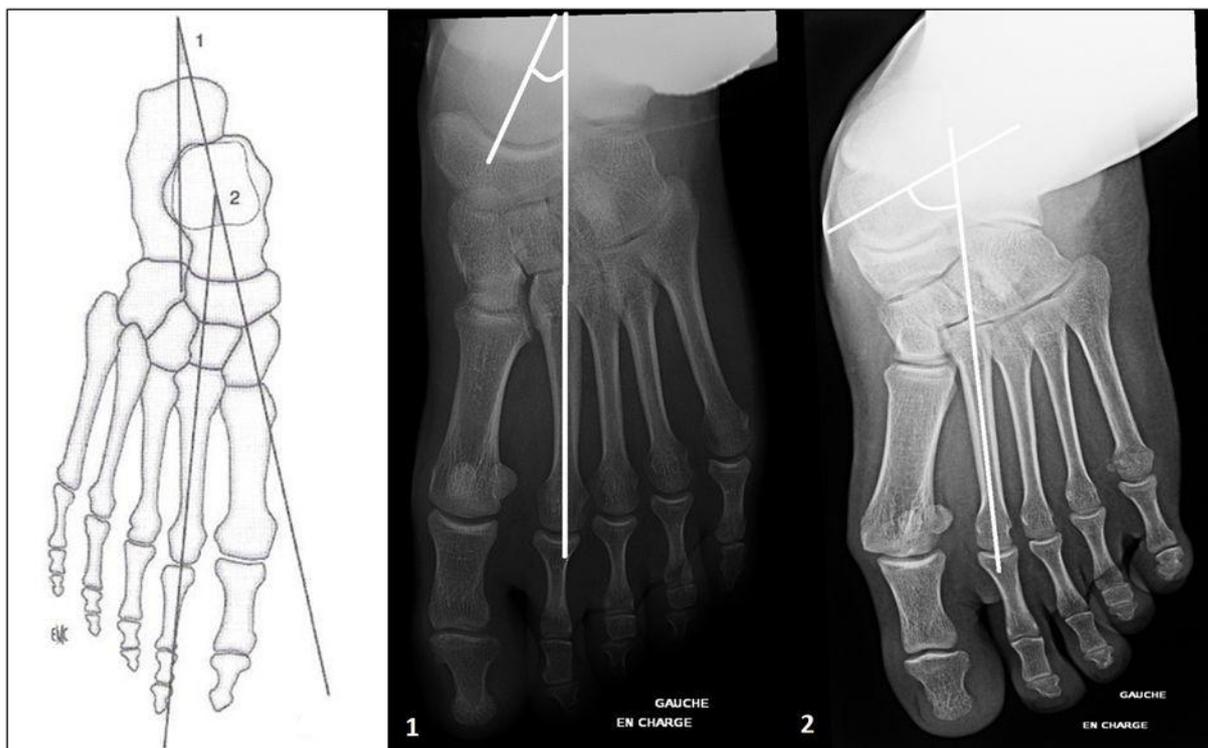


Figure 10 : Mesure de l'abduction par l'angle talo-M2 sur pied normal (1) et pied plat (2).

- la découverte de la tête du talus (angle de Giannestra) secondaire à la subluxation latérale progressive de l'articulation talonaviculaire. Deux lignes sont tracées réunissant les extrémités cartilagineuses de la tête du talus d'une part, et les extrémités articulaires de la partie proximale de l'os naviculaire d'autre part. Le point équidistant de chaque extrémité est noté sur chacune des deux droites et la perpendiculaire est tracée à partir de ce point déterminant le centre de la surface articulaire talienne et le centre de la surface articulaire naviculaire. L'angle de couverture est l'angle entre les centres des deux surfaces articulaires et le point médian de la ligne joignant les extrémités articulaires de la tête du talus (cf. figure 11).

On peut également sur cette incidence analyser l'angle calcanéocuboïdien, rechercher un hallux valgus, une dysmorphie et des remaniements dégénératifs ou microtraumatiques du bord médial du talus et du naviculaire.

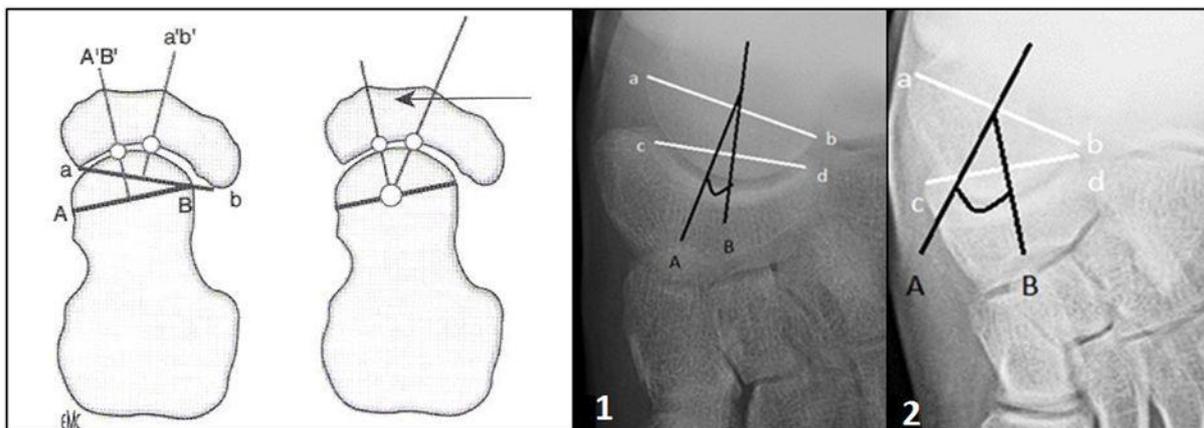


Figure 11 : Mesure de l'angle de couverture de la tête du talus normal (1) et augmenté dans le pied plat par bascule plantaire et médiale du talus et abduction de l'avant-pied (2).

### **INCIDENCE DE MEARY : CHEVILLE DE FACE EN CHARGE AVEC CERCLAGE**

Elle permet d'objectiver la déformation frontale de l'arrière-pied, et notamment de rechercher un valgus calcanéen. Ce cliché est réalisé en utilisant un fil métallique passant par les malléoles en entourant le talon. L'axe du tibia coupe normalement la zone d'appui du talon à l'union du tiers médial et des deux tiers latéraux, matérialisant le valgus physiologique. Il peut également être mesuré entre la verticale et la droite reliant le milieu du dôme du talus et le milieu de la zone d'appui (cf. figure 12). Il est normalement de 3 à 5°. Pour que cette mesure soit fiable, il faut s'assurer que la cheville soit parfaitement de face et que le cerclage métallique passe bien par le talon et non par les malléoles, ce qui diminue l'amplitude. Ce cliché permet également de visualiser l'abduction de l'arrière-pied. La mise en place d'une talonnette réductrice (coin varisant postérieur) permet d'évaluer la réductibilité de ce valgus.



Figure 12: Incidence de Méary: pied normal (1) ; valgus de l'arrière-pied sur pied plat (2).

### **PIED DE TROIS-QUARTS INTERNE = PIED DÉROULÉ**

Cette incidence n'est pas réalisée de façon systématique. Il s'agit d'une incidence particulièrement utile pour éliminer la synostose calcanéo-naviculaire. Elle n'est donc réalisée que s'il existe un doute sur la présence d'une synostose sur les clichés de face et de profil. Elle permet également une étude correcte des différents interlignes du tarse antérieur, permettant ainsi de dépister l'existence de lésions arthrosiques débutantes. Néanmoins l'examen tomodensitométrique reste l'examen de choix pour l'analyse des synostoses (7).

## **2. Autres modalités d'imagerie**

Le scanner, l'IRM, et l'échographie sont demandés en seconde intention et pour des indications très précises. L'IRM et l'échographie sont intéressantes pour l'analyse du tendon du muscle tibial postérieur et du ligament calcanéo-naviculaire plantaire (ou spring ligament) dans les formes réductibles de pied plat. Le scanner

est recommandé dans les formes fixées, à la recherche d'une synostose de l'arrière-pied ou de remaniements dégénératifs débutants (4, 12).

## **F. Traitement du pied plat primitif (7, 24)**

La majorité des pieds plats primitifs de l'adulte sont asymptomatiques et ne justifient d'aucune mesure thérapeutique si ce n'est une surveillance clinique évolutive des déformations. Les pieds plats symptomatiques bénéficient en premier lieu d'une prise en charge médicale ayant pour objectif de compenser la déformation et réduire le retentissement douloureux. Le traitement chirurgical ne sera envisagé qu'en cas d'échec d'un traitement médical suffisamment prolongé et bien conduit comportant une adaptation progressive des semelles (7).

### ***a) Traitement médical***

Une rééducation fonctionnelle peut être proposée afin de renforcer les muscles susceptibles de limiter l'effondrement de l'arche médiale (muscles tibial postérieur et long fibulaire) et lutter contre la rétraction tricipitale. Des orthèses peuvent être prescrites pour réduire les déformations et leur retentissement douloureux. Deux types d'orthèses sont disponibles : orthèses de correction et orthèses de compensation.

- *Les orthèses de correction* (ou semelles orthopédiques) permettent un soutien de la voûte plantaire interne et se comportent comme un coin varisant postéro-médial limitant le valgus calcanéen. Une talonnette peut être utile en cas d'équinisme associé. Ces orthèses seraient plus efficaces en cas de déformation souple et réductible.

- Les orthèses de compensation ont pour but d'améliorer la répartition des contraintes mécaniques et procurent un effet antalgique en réduisant la distension capsulo-ligamentaire.

Le rôle des orthèses reste cependant discuté (25). Si elles n'apportent pas de véritable correction de la déformation, elles ont un rôle sur le confort de la marche et la qualité du chaussage, en particulier chez les enfants. Lorsque la déformation du pied est majeure et qu'elle apparaît précocement, quelle que soit sa réductibilité, une surveillance clinique est indispensable et les possibilités chirurgicales de correction doivent être envisagées.

### ***b) Traitement chirurgical***

Quelle que soit la technique utilisée, le réalignement de l'arrière pied et le rétablissement de l'arche médiale sont les deux objectifs essentiels du traitement chirurgical. De nombreuses techniques ont été décrites incluant les ostéotomies, les arthrodèses et les gestes sur les parties molles. Le choix entre ces différentes possibilités se fonde sur l'examen clinique et radiologique, et tient compte de l'âge du patient, de son niveau d'activité, de l'importance de la déformation, de sa réductibilité et d'éventuels remaniements arthrosiques associés. Les traitements conservateurs associant à des degrés divers des gestes sur les parties molles (raccourcissement de l'aponévrose plantaire, allongement du tendon calcanéen, capsulorrhaphie talonaviculaire médioplantaire ou des anomalies d'insertion du tibia antérieur) (26) et des ostéotomies calcanéennes sont préférés devant des déformations réductibles chez les sujets jeunes. Les arthrodèses sont privilégiées pour les déformations fixées, en présence de lésions dégénératives chez les patients âgés (27, 28).

## II. LES TORSIONS DES MEMBRES INFÉRIEURS

### A. Torsions physiologiques des membres inférieurs

La torsion d'un os long se définit comme une déformation de cet os autour de son axe longitudinal de telle sorte que les axes transversaux épiphysaires sont décalés et ne siègent plus dans le même plan vertical (cf. figure 13) (29). Elle n'est en rien synonyme de rotation. Aux membres inférieurs, il existe de manière physiologique une torsion fémorale et une torsion tibiale. Celles-ci vont évoluer différemment au cours de la croissance, avec l'acquisition de la marche et sous l'influence de facteurs génétiques, mécaniques (poids, musculature...) et dynamiques, pour finalement conditionner la morphologie des membres inférieurs mais également l'angle du pas (angle formé par l'axe longitudinal du pied et la ligne de progression) et la manière de marcher (30).

La torsion fémorale est en pratique assimilée à l'antéversion (ou antétorsion) fémorale. Elle est spécifique à la position bipède de l'homme. Maximale à la naissance (de l'ordre de 35 à 40°), elle diminue progressivement au cours de la croissance (en moyenne de 1° par an) pour être finalement comprise entre 5 et 25° (cf. figures 13 et 14) (29, 31, 32).

La torsion tibiale évolue en sens inverse de la torsion fémorale. Elle est nulle à la naissance (voire il existe une torsion tibiale interne en raison des contraintes fœtales liées au positionnement). Cette torsion tibiale va ensuite spontanément évoluer vers une torsion tibiale externe, pour être finalement comprise entre 20 et 45° (cf. figure 14) (29, 33). Les valeurs normales sont cependant plus variables que

pour la torsion fémorale. Compte tenu de cette importante variabilité, on parlera « d'antétorsion fémorale exagérée » si les valeurs angulaires sont supérieures de 10 à 15° à la valeur moyenne. L'antétorsion fémorale est considérée comme pathologique si ce chiffre augmente ou ne varie pas, ou si apparaissent des répercussions sur le rachis (hyperlordose lombaire) ou le tibia. Les torsions tibiales sont considérées quant à elles comme anormales si une torsion tibiale interne persiste après l'âge de 4 ans ou si la torsion tibiale externe est supérieure à 40° à l'âge adulte.

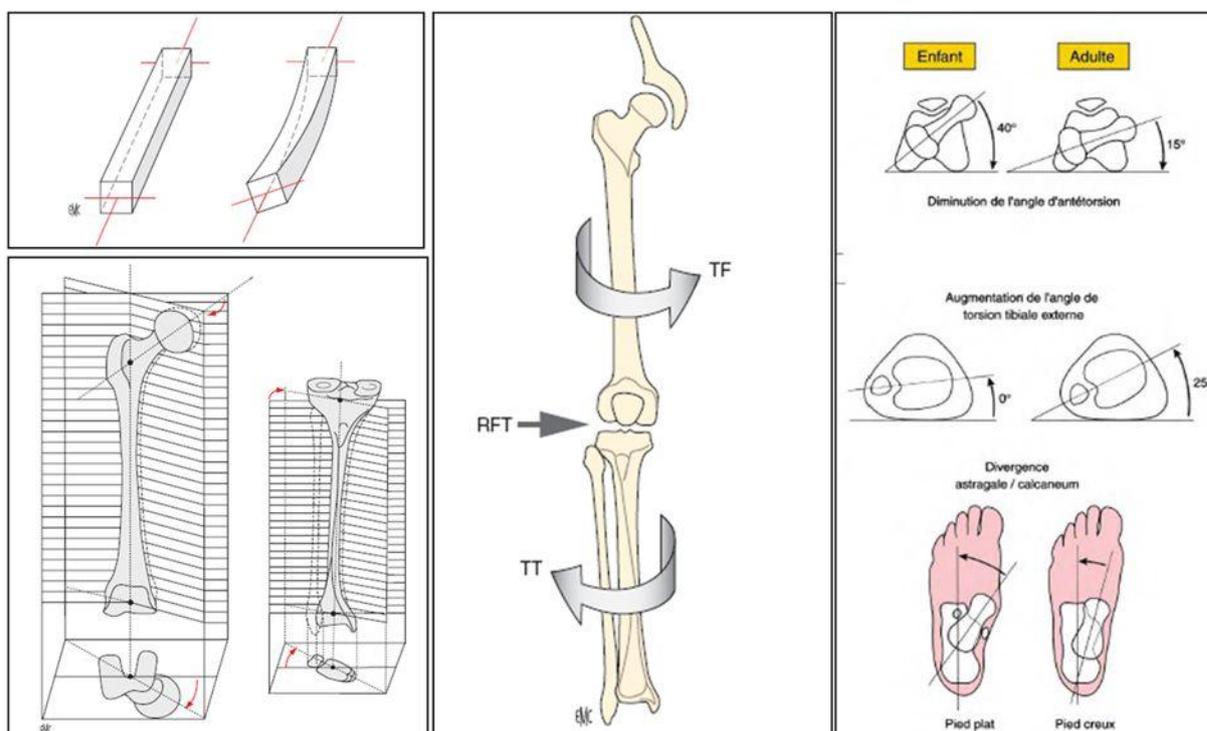
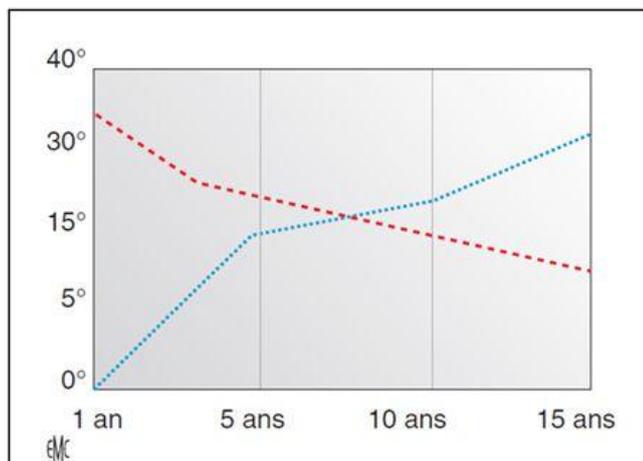


Figure 13 : La torsion d'un os est une déformation autour de son axe, les fémurs et tibias ont des modules de torsion opposés, le déplacement réciproque des ces deux os est un mouvement de rotation fémorotibiale (RFT), TF : torsion fémorale, TT : torsion tibiale (32).



**Figure 14 : Évolution de l'antéversion fémorale (ligne en tirets) et de la torsion du squelette jambier (ligne en pointillés) avec l'âge (29).**

L'évolution des torsions physiologiques dans le plan horizontal est indissociable de l'évolution des morphotypes frontaux et sagittaux des membres inférieurs (29, 34). Cette évolution est la sous dépendance de nombreux facteurs (génétiques, mécaniques, musculaires, posturaux ...). Dans le plan frontal, le morphotype évolue classiquement selon trois phases (cf. figure 15) :

- varus fémoro-tibial de la naissance à l'âge de 18 mois ;
- valgus fémoro-tibial de l'âge de 2 ans à la puberté ;
- tendance au varus chez le garçon et au valgus chez la fille de la puberté à la

fin de la croissance.

Ainsi, à la fin de la croissance, le morphotype frontal se répartit comme suit : chez l'homme : 50% de genu varum, 40% de genoux normo-axés et 10% de genu valgum ; chez la femme : 20% de genu varum, 40% de genoux normo-axés et 40% de genu valgum.

Dans le plan sagittal, l'évolution du morphotype est moins bien connue. Elle est variable en fonction de l'âge et du sexe : en effet le récurvatum physiologique pouvant atteindre 10° avant 8 ans ; 10° chez la femme et 5° chez l'homme, et un

flessum ou un récurvatum peut être présent de manière physiologique en fin de croissance (29, 34-36).

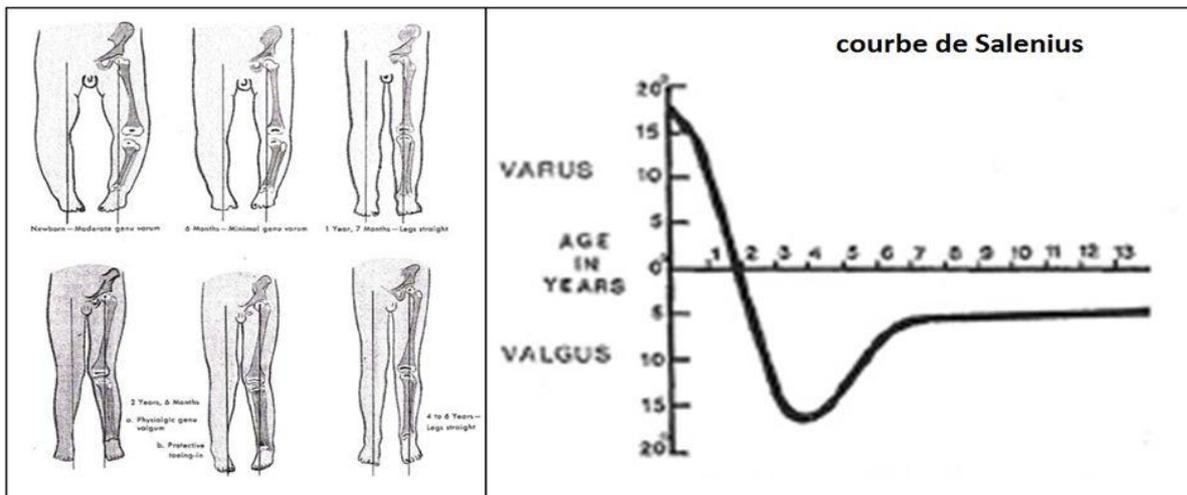


Figure 15: Évolution de l'alignement des membres inférieurs dans le plan frontal au cours de la croissance (37).

## B. Anomalies de torsion des membres inférieurs (29)

Il n'existe pas un profil rotationnel standard normal mais un éventail très large de profils rotationnels standards normaux. En outre, des variations existent d'un individu à l'autre, liées à la race, au sexe et à l'âge (38). Néanmoins, lorsque la mesure des torsions des membres inférieurs s'écartent de façon significative des valeurs moyennes (valeurs supérieures à 2 déviations standards par rapport à l'âge), on parle d'anomalies de torsion (ou d'anomalies rotationnelles) des membres inférieurs. Ces anomalies peuvent être unilatérales et asymétriques (et dans ce cas, presque toujours secondaires) ou bilatérales et symétriques (et dans ce cas, souvent primitives). Elles peuvent concerner le fémur (hyperantéversion fémorale, rétrotorsion fémorale), le tibia (insuffisance ou excès de torsion tibiale externe) ou les deux (triple

déformation associant une hyperantéversion fémorale, un excès de torsion tibiale externe et un récurvatum du genou).

Comme pour le pied plat primitif, les anomalies de torsion des membres inférieurs sont fréquentes chez l'enfant, souvent primitives et bénignes, et d'évolution spontanément favorable. Lorsqu'elles persistent à l'âge adulte, elles sont souvent bien tolérées. Elles peuvent cependant se modifier au cours du temps, sous l'influence des habitudes de vie, de facteurs capsulo-ligamentaires et musculaires, du vieillissement osseux physiologique ou d'éventuelles pathologies osseuses acquises (39). Certains facteurs doivent être considérés comme des facteurs aggravants : âge supérieur à 45 ans, surcharge pondérale.

Certains troubles de torsion peuvent être à l'origine de symptômes : instabilité patellaire et gonalgies dans la triple déformation ; risque d'arthrose de hanche dans la rétrotorsion fémorale (29). Le traitement des anomalies primitives de torsion des membres inférieurs est variable, fonction de l'âge, souvent conservateur (et notamment postural chez l'enfant), exceptionnellement chirurgical (ostéotomies de dérotation fémorale et/ou tibiale).

### **C. Techniques de mesure des torsions des membres inférieurs**

Elles peuvent être cliniques (et souvent suffisantes en pratique) ou faire appel à l'imagerie (radiographies, échographie, scanner, IRM). Quelle que soit la méthode utilisée, il existe des causes d'erreurs liées à la technique elle-même (exemple, les radiographies) ou aux repères anatomiques retenus. Même s'il est irradiant, le scanner est actuellement l'examen de référence pour quantifier ces troubles de

torsions de manière fiable et reproductible. Cette reproductibilité est cependant meilleure pour l'antéversion fémorale que pour la torsion tibiale externe, notamment chez l'enfant en raison de la matrice cartilagineuse invisible au scanner. Certains auteurs ont proposé d'avoir recours à l'IRM chez l'enfant pour effectuer ces mesures de torsion (caractère non irradiant, visibilité de la matrice cartilagineuse) mais cette technique demeure d'accès plus difficile (40). Plus récemment, une nouvelle technique d'imagerie baptisée EOS<sup>®</sup> (cf. chapitre correspondant) est apparue et permet d'obtenir des mesures de torsion des membres inférieurs en position debout de manière fiable, reproductible, et moins irradiante qu'en radiographie ou au scanner (41). Dans une étude récente, Buck et coll. ont pu démontrer que le système EOS<sup>®</sup> peut, par le biais de sa modélisation 3D des membres inférieurs, remplacer la tomodensitométrie pour la mesure des torsions fémorales et tibiales, avec le même niveau de précision et de reproductibilité (42). Trois types de mesures sont communément réalisés : l'antéversion fémorale, la torsion tibiale dans le plan horizontal, et l'alignement des membres inférieurs dans le plan frontal et/ou sagittal. Les deux premières mesures s'effectuent au scanner (cf. figures 16 et 17) ou sur EOS<sup>®</sup> ; l'alignement des membres inférieurs s'effectue en radiographie ou sur EOS<sup>®</sup>.

- L'antéversion fémorale : angle défini par l'axe du col fémoral et la tangente à la partie postérieure des condyles fémoraux. Valeur normale à l'âge adulte = 14 +/- 7°(1).
- La torsion tibiale : angle défini par la tangente à la partie postérieure de l'épiphyse tibiale proximale et l'axe bimalléolaire. Valeur moyenne à l'âge adulte = 20°.
- L'alignement des membres inférieurs : angle défini par l'axe mécanique du fémur (axe joignant le centre de la tête fémorale au centre des épines tibiales) et

l'axe mécanique du tibia (axe joignant le centre du massif des épines tibiales au milieu de l'articulation tibio-talaire).



Figure 16: Mesure de torsion au scanner. Technique de mesure des angles.

A. Antéversion fémorale B. Rotation dans le genou C. Torsion tibiale externe (30).

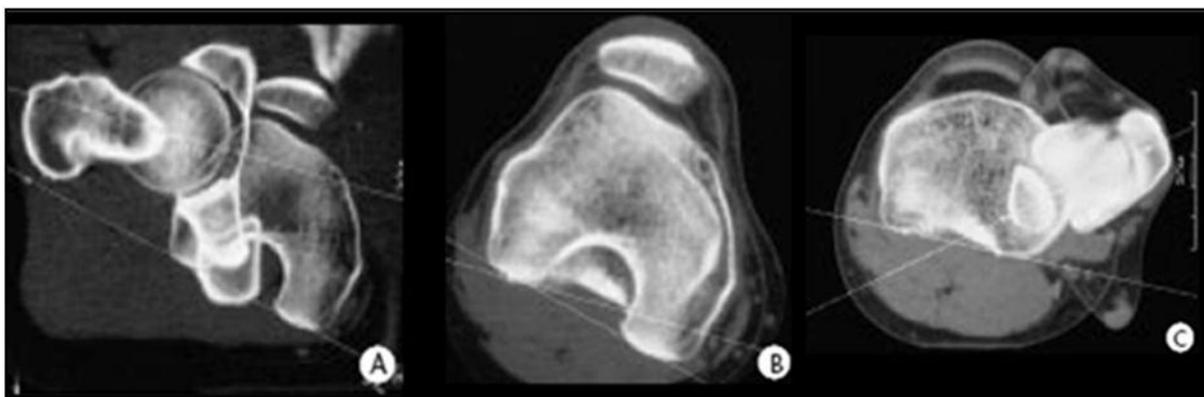


Figure 17: Exemples de mesure au scanner avec une antéversion fémorale de 15° (A, B) et une torsion tibiale externe de 36° (C) (30).

Deux autres index de mesure ont été définis pour essayer de classer les morphotypes rencontrés en présence d'anomalies de torsion des membres inférieurs (1, 32) : l'index de torsion tibio-fémoral et l'index de cumul des torsions. Ils sont moins souvent utilisés en pratique quotidienne.

- L'index de torsion tibio-fémorale de Lerat : index défini par la différence entre la torsion tibiale externe et l'antéversion fémorale (20° en moyenne).
- L'index de cumul des torsions de Duparc et Thomine : index défini par la somme algébrique des torsions fémorales et tibiales (11.7° en moyenne).

## D. Conséquences des torsions au cours de la marche.

Il est important de considérer le membre inférieur comme une chaîne polyarticulaire fermée lorsque le pied est placé en charge au cours de la marche. L'angle du pas doit être compatible avec une bonne qualité d'appui et une bonne impulsion sous l'hallux en fin de phase de propulsion. L'angle du pas est apprécié lorsque le patient marche vers l'examineur. Il est formé par l'axe long du pied et la ligne de progression. A l'âge adulte, il est constant pour chaque sujet. Il représente la conséquence des rotations de la hanche, du fémur, du genou, du tibia et de l'articulation sous-talienne. Il est la seule résultante quantifiable de la morphologie rotationnelle sur le plan dynamique (43).

Lorsqu'il existe une torsion des membres inférieurs il est important de préciser son caractère équilibré ou déséquilibré. Le morphotype global du membre inférieur est déterminé par l'addition des torsions osseuses du fémur (négatives) et du tibia (positives). Cette somme algébrique aboutit à un angle d'index de cumul des torsions (ICT) correspondant à l'angle du pas optimal par rapport à l'axe de progression (30). L'angle du pas moyen de 10-15° correspond à un ICT moyen. Un ICT faible rapproche l'axe du pied de l'axe de progression et diminue donc l'angle du pas. Inversement un ICT fort oriente l'axe du pied en dehors et ouvre donc l'angle du pas (cf. figures 18 et 19) (32)

L'angle du pas n'apparaît pas corrélé significativement aux angles de torsions osseuses segmentaires du membre inférieur. Seber a montré que même si les torsions osseuses sus-jacentes présentent une grande dispersion (torsion fémorale de 14 à 28° et torsion tibiale de 16 à 50°), l'angle du pas était mesuré pratiquement symétrique et présentait de faibles variations (44). Toute torsion osseuse sous-entend ainsi une compensation articulaire permettant la prise d'appui lors de la phase portante du pas avec un angle du pas optimal (32). Cependant les valeurs

normales de l'angle du pas peuvent être très étendues, expliquant ainsi l'immense variété de morphotypes normaux. On considère qu'un adolescent normal en fin de croissance présente les caractéristiques suivantes : une antétorsion fémorale comprise entre 5 et 25°, une torsion tibiale externe comprise entre 20 et 45°, un angle du pas entre 5 et 20°, et de larges variations frontales en varus et valgus (29).

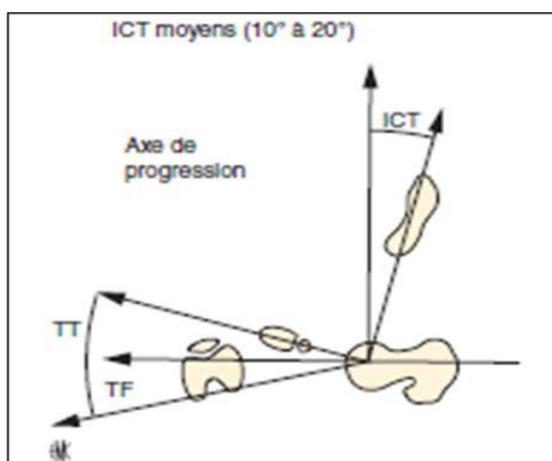


Figure 18 : Index de cumul des torsions (ICT) moyens sur morphotype torsionnel équilibré : la somme algébrique des torsions fémorales (TF) et tibiales (TT) aboutit à un angle d'ICT qui correspond à un angle optimal par rapport à l'axe de progression (32)

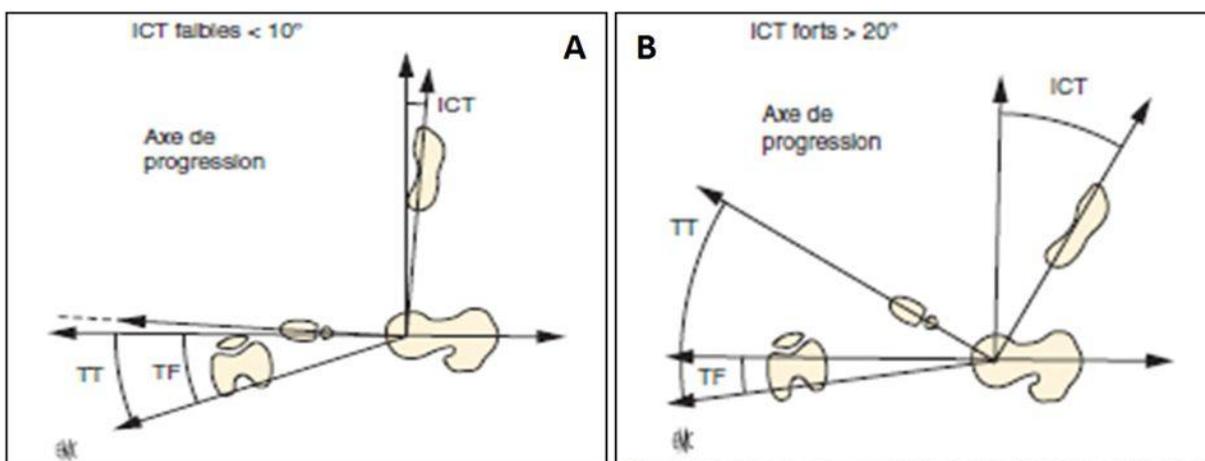


Figure 19 : ICT moyens sur profils torsionnels déséquilibrés (32).

A : ICT faible plaçant l'axe du pied très proche de l'axe de progression ; une rotation externe de hanche est nécessaire pour ouvrir l'angle du pas.

B : ICT fort plaçant le pied en forte ouverture de l'angle du pas entraînant une rotation interne de hanche et/ou de genou pour diminuer cet angle.

### **III. PIED PLAT PRIMITIF ET ANOMALIES DE TORSION DES MEMBRES INFÉRIEURS**

Les conséquences d'un vice rotationnel sur le pied ne sont pas automatiques. Il existe cependant une tendance générale qui permet de dire que, parallèlement à la détorsion fémorale et l'extratorsion tibiale, la morphologie du pied se modifie avec la croissance. Ainsi le pied, qui est plat à 2 ans, se creuse progressivement pour obtenir sa forme définitive vers 7 ou 8 ans. Ce mouvement de détorsion permet au calcanéum de se replacer sous le talus qui suit la torsion tibiale externe. Il existe ainsi une relation entre torsion tibiale externe élevée et pied plat, et, inversement, entre torsion tibiale externe faible et pied creux (1, 29).

À notre connaissance, les relations éventuelles entre l'existence d'un pied plat primitif et des troubles de torsion des membres inférieurs sont peu connues, en particulier chez l'adulte. Une relation entre pied plat primitif et anomalies de torsion des membres inférieurs est plausible car le morphotype torsionnel du membre inférieur induit la participation des rotations dans les différents niveaux articulaires pour orienter finalement le pied.

## IV. LE SYSTÈME EOS<sup>®</sup>

### A. Présentation

Depuis une dizaine d'années est apparue une nouvelle modalité d'imagerie par rayons X appelée système EOS<sup>®</sup>, système de radiologie numérique très basse dose issu des travaux du Pr Georges Charpak, Prix Nobel de Physique en 1992. Il est le résultat d'une collaboration étroite et pluridisciplinaire entre la société française Biospace Med fondée par Georges Charpak et les équipes du LBM (laboratoire de mécanique, ENSAM, Paris) et du LIO (laboratoire d'imagerie et d'orthopédie, ETS, Montréal). Un prototype clinique a été installé en 2004 à l'hôpital Saint-Vincent-de-Paul à Paris pour évaluer les bénéfices potentiels en pédiatrie et notamment, chez les enfants suivis pour scoliose. Depuis cette date, de nombreux systèmes EOS<sup>®</sup> ont été installés en Europe et aux USA pour prendre en charge des enfants et des adultes présentant diverses pathologies musculosquelettiques. Le système EOS<sup>®</sup> est actuellement commercialisé par la société EOS Imaging, anciennement Biospace Med. Il se présente sous la forme d'une cabine d'environ 2m<sup>3</sup> au centre de laquelle le patient se tient debout (ou assis) pendant l'acquisition des images (cf. figure 20). Des moyens de contention peuvent l'y aider (barre d'appui, plot crânien).

Il permet d'obtenir en un seul balayage, et en un temps d'acquisition très court, des radiographies du squelette entier en position debout. Ce système est très intéressant en pathologie musculosquelettique pour l'étude des troubles de la statique rachidienne mais aussi des troubles de torsion des membres inférieurs chez l'enfant et l'adulte. Le système EOS<sup>®</sup> permet ainsi d'obtenir des reconstructions 3D surfaciques des membres inférieurs à partir desquelles il est possible d'obtenir des

mesures 2D dérivées prenant en compte les déviations des membres inférieurs dans le plan frontal, dans le plan sagittal, et les torsions dans le plan horizontal.

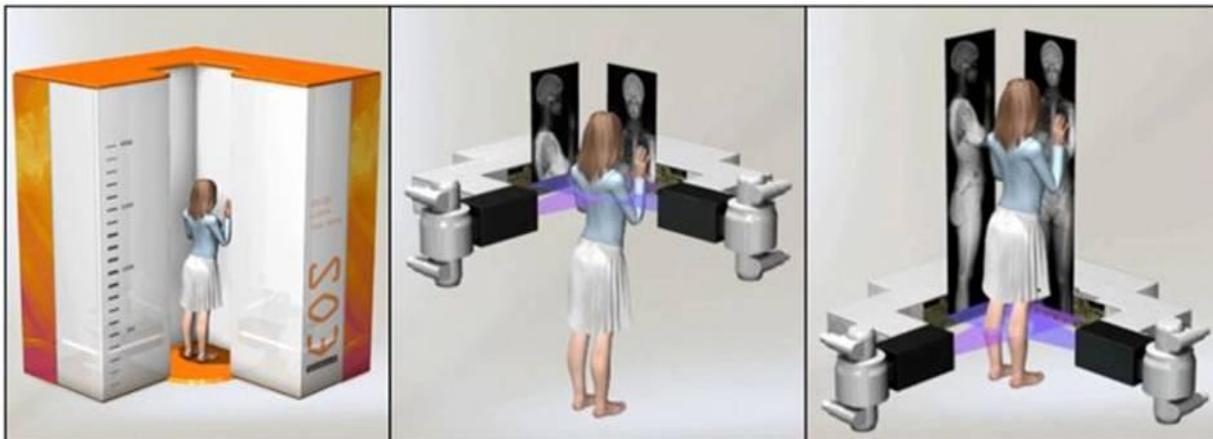


Figure 20: Illustrations du système EOS®.

## B. Principes techniques

Le système EOS® renferme deux systèmes orthogonaux composés chacun d'un tube à rayon X et d'un détecteur couplés. Chaque tube émet un faisceau de rayons X collimaté, recueilli après traversée du patient par le détecteur correspondant. Ce système est basé sur la technologie de la chambre multifils du Pr Charpak (45) qui fonctionne de la manière suivante ( cf. figure 21) :

- Recueil du rayonnement X incident par le détecteur, après traversée du patient et absorption plus ou moins marquée des rayons en fonction des tissus traversés ;

- Conversion des photons X en électrons par ionisation du détecteur gazeux (xénon) ;

- Amplification (un photon X va alors générer 40 000 électrons) permettant d'améliorer le rapport signal sur bruit et permettant ainsi la réduction de dose ;

- Recueil du signal électrique et traitement des informations par une chaîne électronique dont la dynamique de niveaux de gris est supérieure à celle des systèmes de radiographies numériques (30 - 50 000 niveaux de gris).

La résolution spatiale ainsi obtenue est de 274µm. Lors des acquisitions, le générateur permet de moduler le kilovoltage (de 40 à 140 kV) et les milliampères-secondes (de 10 à 1000mAs), en fonction du morphotype du patient. La formation de l'image se fait par déplacement vertical conjoint du tube à rayon X et du détecteur (acquisition de l'image d'un objet ligne par ligne) (cf. figure 21). La hauteur du balayage est ajustable de 5 à 175 cm et la largeur du faisceau est de 45 cm environ. Il existe également une triple collimation : à la source, avant la sortie du tube, et au détecteur, ce qui permet la suppression du rayonnement diffusé, l'amélioration du rapport signal sur bruit, la réduction de dose d'irradiation, et l'absence de divergence verticale du rayonnement X (cf. tableau 4).

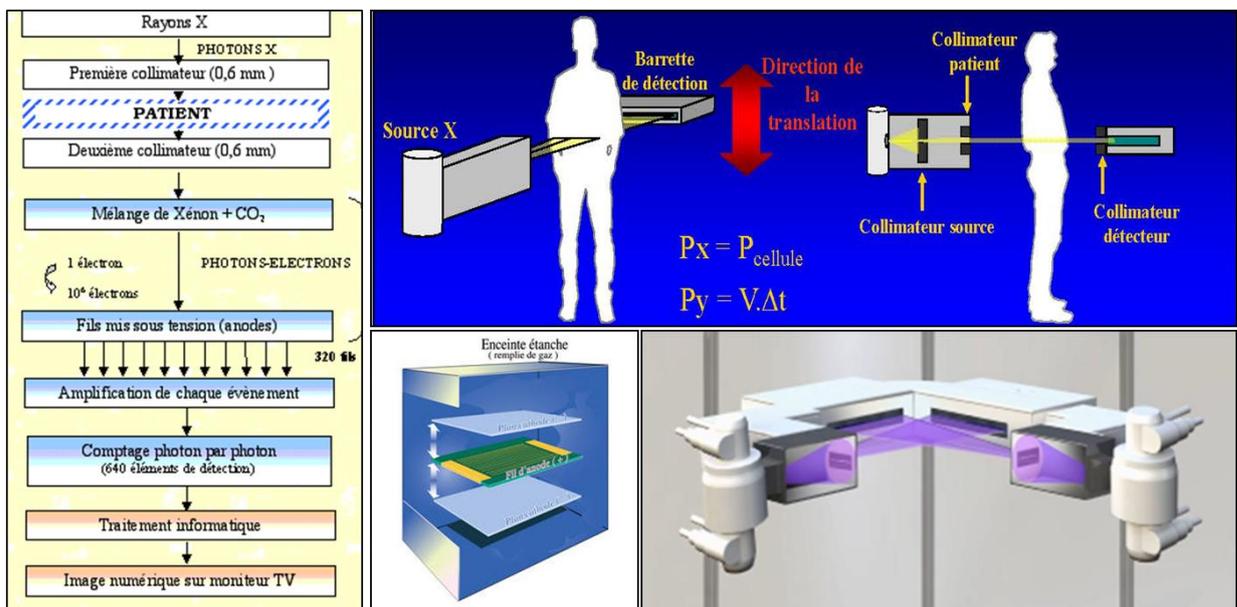


Figure 21 : Principes de formation de l'image du système EOS® .

	EOS®	RADIOGRAPHIES
Faisceau de rayons X	Éventail	Conique
Volume irradié	Faible	Important
Rayonnement diffusé généré	Faible	Important : 80% du flux sortant du patient
Détecteur	Linéaire : fente de collimation très étroite	Plan (2D)
Rejet du rayonnement diffusé	99.9%	Grille anti-diffusion
Arrêt des photons primaires	0	60%

Tableau 4 : Comparaison des principes techniques EOS® versus radiographies.

### C. Avantages

Par comparaison aux radiographies, le système EOS® présente plusieurs avantages :

- Acquisition simultanée et rapide d'images 2D en un balayage unique de face et de profil. Le balayage de la tête aux pieds peut s'effectuer en moins de 20 secondes (vitesse variable, inférieure à 25cm/s en fonction des paramètres d'acquisitions).
- Réduction de la dose de rayonnement d'un facteur 8 à 10 par rapport à la radiologie conventionnelle (cf. tableau 5) (2, 3) et d'un facteur 100 à 600 par comparaison au scanner (cf. figure 22) (46). Une étude réalisée en 2011 comparant les doses de rayonnement reçues par les patients lors de mesures effectuées aux membres inférieurs avec le système EOS® et au scanner a montré que cette dose était en moyenne 4 fois moindre pour les ovaires et 23 fois moindre pour les testicules avec le système EOS® (47).
- Étude de la statique globale (rachis et/ou membres inférieurs) chez un sujet en position debout.

- Bonne qualité des images 2D.
- Absence de distorsion verticale ou d'artéfacts de « stitching » parfois rencontrés avec les clichés radiographiques numérisés grâce au balayage unique.
- Éviction de tout mouvement du patient entre les acquisitions 2D de face et de profil.
- Meilleure analyse des zones de superpositions grâce à la supériorité de la dynamique de niveaux de gris.
- Possibilité d'analyser des tissus de contrastes différents (os, tissus mous) sur un même cliché, grâce à la double énergie (utilisation de deux acquisitions à constantes (kV) différentes).
- Possibilité de reconstructions 3D surfaciques sur console de post traitement rendues possibles grâce au balayage simultané de face et de profil. Ces reconstructions sont très intéressantes pour l'étude des troubles de la statique rachidienne et/ou des membres inférieurs. La précision moyenne des reconstructions obtenues est de l'ordre du millimètre (erreur moyenne= 0.9 mm) ; en cas de déformation osseuse très sévère l'erreur moyenne reste inférieure à 1.5 mm c'est-à-dire tout à fait identique à ce que donne la TDM comparée aux mesures directes effectuées sur pièces anatomiques (2, 3).
- Confort pour le patient : acquisition rapide des images 2D, sans aucune manipulation nécessaire.
- Mesures précises et reproductibles en 2D et 3D même après intervention chirurgicale rachidienne.

	KV		Dose de Peau		Facteur de réduction
	Film	EOS®	Film	EOS®	
Face (Moy)	71	69	1196	127	9.4
Profil (Moy)	83	84	1618	192	8.4

Tableau 5 : Paramètres radiographiques utilisés et dosimétrie au niveau de la peau (46).

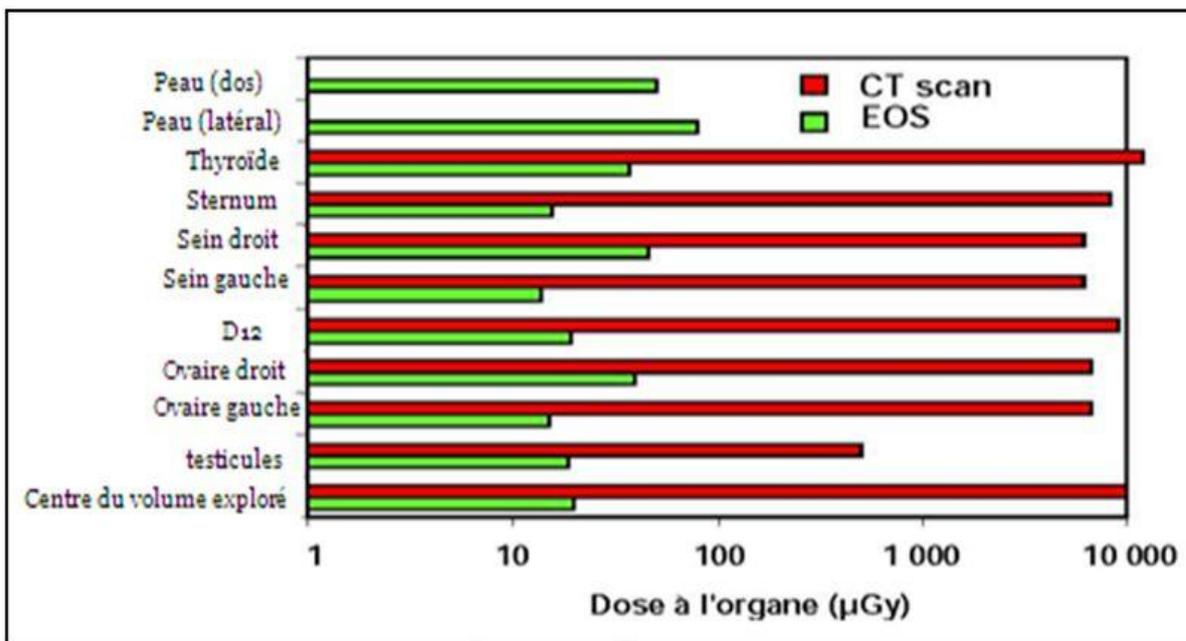


Figure 22 : Doses à l'organe : EOS® versus TDM.

### D. Inconvénients

La seule condition exigée est le maintien de la position debout, parfaitement immobile pendant la durée du balayage. En effet, il existe un risque de déformation latérale de l'image en cas de mouvement du patient pendant l'acquisition des images (cf. figure 23). L'exploration EOS® est de qualité pour l'étude du squelette axial. Ses performances sont moins bonnes pour l'étude des extrémités et de manière générale, chez les adultes corpulents car la dose de rayonnement utilisée est moindre.



Figure 23 : Exemples de flou de mouvement.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

Notre étude est le fruit d'une collaboration entre le service d'imagerie de l'appareil locomoteur (Pr A Cotten), le service d'imagerie de l'Enfant (Pr N Boutry) et le service de chirurgie orthopédique adulte (Pr C Maynou) du CHRU de Lille. L'objectif principal de cette étude était de rechercher, grâce au système EOS<sup>®</sup>, d'éventuels troubles de torsion des membres inférieurs chez des patients adultes souffrant d'un pied plat symptomatique. Il s'agissait d'une étude prospective, monocentrique (CHRU de Lille), visant à comparer un groupe de patients adultes à des sujets témoins.

### I. MATÉRIELS

Notre étude concernait le pied plat de l'adulte (c'est-à-dire au CHRU de Lille, les patients dont l'âge est supérieur à 15 ans et 9 mois au moment de la consultation), à l'exclusion de l'enfant.

#### A. Patients

Le recrutement des patients s'est déroulé de septembre 2009 à mai 2012. Les patients étaient adressés en consultation d'orthopédie adulte, au Centre de Consultations et d'Imagerie de l'Appareil Locomoteur (CCIAL) du CHRU de Lille,

pour pied plat symptomatique. Certains patients se plaignaient de douleurs périmalloolaires, d'autres présentaient une déformation du pied. Aucun des patients recrutés n'était porteur d'une malformation osseuse connue ou atteint de troubles neurologiques. L'anamnèse et l'examen clinique de ces patients permettaient d'éliminer les causes de pied plat secondaire (cf. tableau 1) et, ainsi, de confirmer que la symptomatologie clinique était liée au pied plat. L'ensemble des pieds définis cliniquement comme des pieds plats valgus par le chirurgien orthopédique entrainait dans notre protocole de recherche.

## **B. Sujets témoins**

Nous avons décidé de ne pas considérer le nombre de patients mais le nombre de pieds plats et d'apparier en conséquence chaque pied plat à un pied témoin. Pour réaliser cette étude comparative, un groupe de sujets témoins (absence de pied plat clinique et radiographique, absence de trouble statique des membres inférieurs) et consentants a été constitué, apparié en âge et en sexe aux patients. Le recrutement a été majoritairement réalisé au sein du personnel médical et paramédical des services d'imagerie du CHRU de Lille. Afin d'apparier les sujets jeunes (âge inférieur à 20 ans) et âgés (âge supérieur à 65 ans) à notre population de pieds plats, le recrutement a aussi été réalisé parmi les patients se présentant à Jeanne de Flandre pour réaliser des examens EOS<sup>®</sup>. Ces examens étaient réalisés à la demande des médecins généralistes : pangonométrie des membres inférieurs pour recherche d'inégalité de longueur des membres inférieurs chez les sujets jeunes, clichés corps entier pour appréciation de la statique du rachis et des membres inférieurs chez les patients plus âgés. Par principe, un consentement oral leur était demandé.

## II. MÉTHODES

Chaque patient bénéficiait le même jour d'un bilan radiographique au Centre de Consultations et d'Imagerie de l'Appareil Locomoteur (CCIAL) ainsi que d'une acquisition pangonométrique sur le système EOS dans le service d'imagerie de l'Enfant à Jeanne de Flandre.

### A. Radiographies

Trois incidences centrées sur le (ou les) pied(s) pathologique(s) étaient réalisées : pied en charge de face, de profil, et incidence de Méary. Les mesures suivantes étaient réalisées sur les radiographies, à l'aide du PACS : angle de Djian-Annonier, divergence talo-calcanéenne et valgus calcanéen. Elles permettaient de confirmer le pied plat et d'évaluer son retentissement global. L'interprétation des radiographies, avec relevé des différentes mesures, était réalisée au fur et à mesure des acquisitions.

### B. Système EOS®

Un balayage des membres inférieurs en totalité (depuis les têtes fémorales jusqu'aux pieds) était réalisé sur le système EOS®, simultanément de face et de profil. Pour éviter une complète superposition des côtés droit et gauche sur le profil, les pieds des patients étaient décalés d'environ 5 cm selon un axe antéro-postérieur. Un logiciel dédié (StérEOS®) permettait ensuite une modélisation 3D de l'enveloppe osseuse des fémurs et des tibias, en utilisant des modèles statistiques, et calculait automatiquement un ensemble de paramètres dérivés des reconstructions 3D (cf. tableau 6).

Paramètres calculés par StérEOS®	
<b>LONGUEUR</b>	Fémorale Tibiale Longueur totale
<b>HANCHE</b>	Diamètre de la tête fémorale Angle cervico-diaphysaire Longueur du col Offset fémoral
<b>GENOU</b>	Varus ou valgus Flessum-récurvatum Angle fémoral mécanique Angle tibial mécanique Angle HKS
<b>TORSION</b>	Torsion fémorale Torsion tibiale Rotation fémoro-tibiale

**Tableau 6: Paramètres calculés par StérEOS®.**

Les reconstructions 3D étaient réalisées par les manipulateurs du service d'imagerie de l'Enfant. En suivant les recommandations de la firme (Biospace Imaging, Paris, France) commercialisant EOS® et son logiciel dédié (StérEOS®), ceux-ci devaient placer les points anatomiques de référence sur les fémurs et les tibias et ajuster les calques avant de lancer le processus de reconstruction 3D. Toutes les reconstructions 3D étaient contrôlées secondairement par l'ingénieur d'application Biospace Imaging, sans savoir s'il s'agissait d'un patient ou d'un sujet témoin. Les paramètres dérivés étaient ensuite calculés de manière automatique à partir des reconstructions 3D, reportés dans des tableaux Excel et imprimés sous forme d'un rapport type pour chaque patient et chaque témoin (cf. figures 24, 25 et 26).

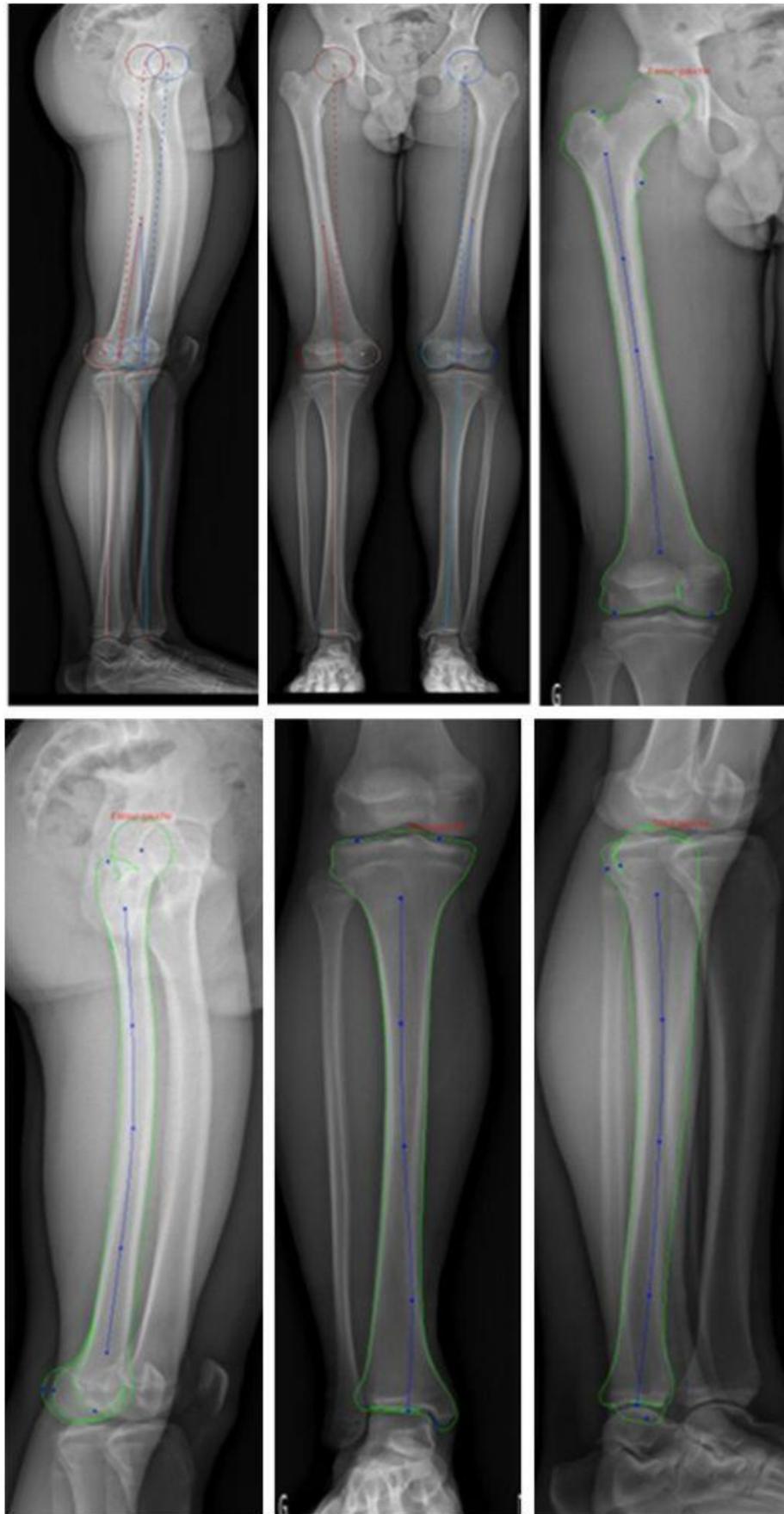


Figure 24 : Placement des points anatomiques de référence ; ajustement de la reconstruction et des calques.

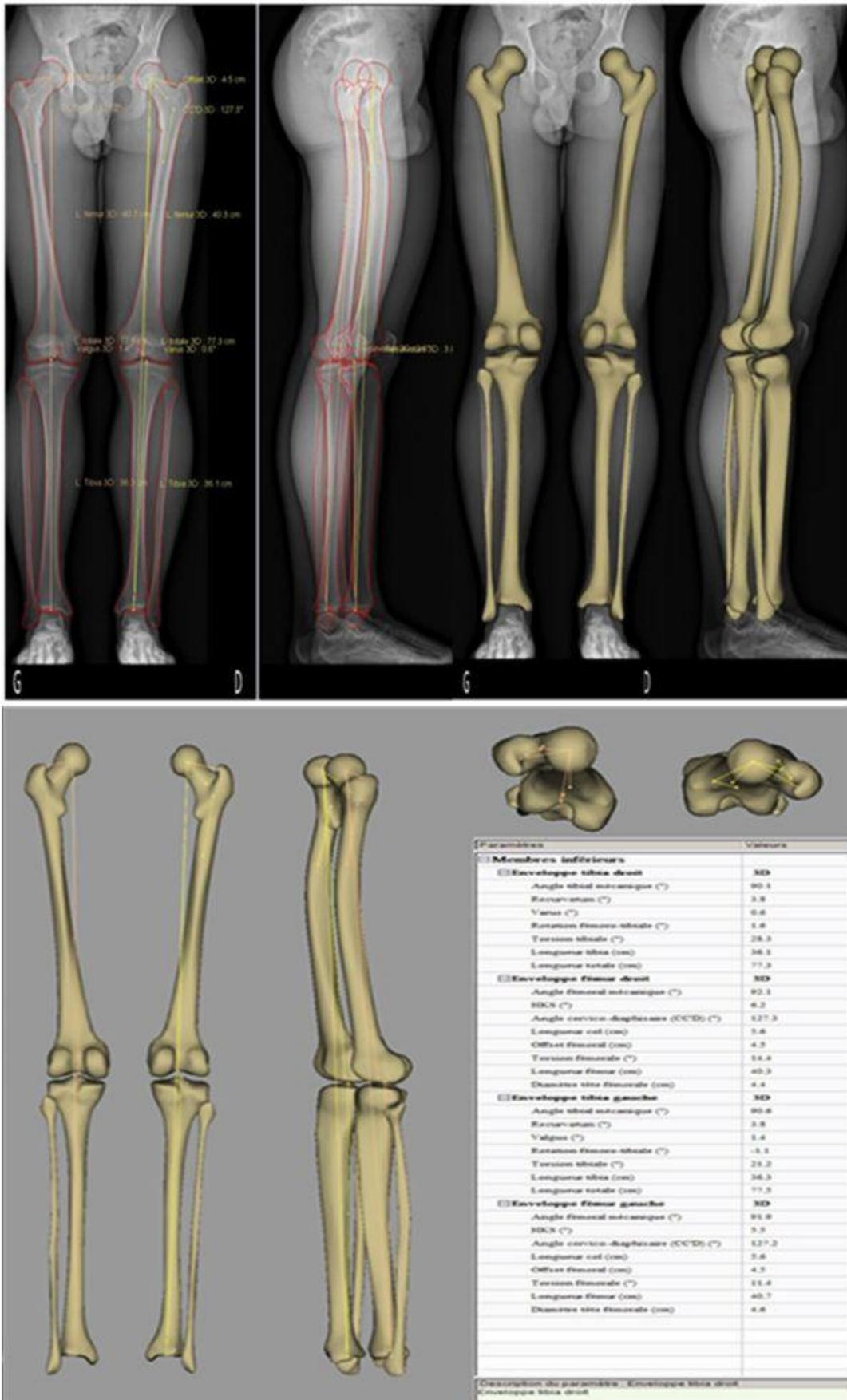


Figure 25 : Modélisation 3D de l'enveloppe osseuse des fémurs et des tibias par le logiciel StérEOS®.

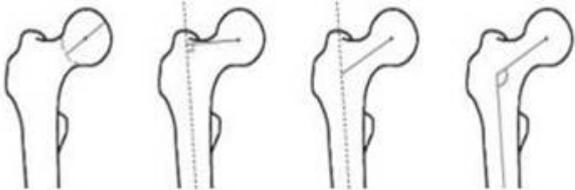
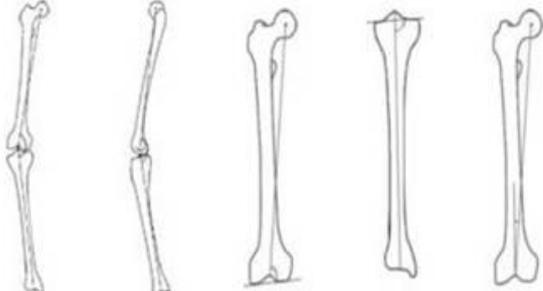
<i>Paramètres membres inférieurs</i>			
<b>Longueurs (3)</b>			
	<b>Droit</b>	<b>Gauche</b>	
Longueur fémur	40.9 cm	41.1 cm	
Longueur tibia	35.4 cm	35.3 cm	
Longueur totale	77.0 cm	77.1 cm	
<b>Hanche (3)</b>			
	<b>Droit</b>	<b>Gauche</b>	
Diamètre tête fémorale	41 mm	41 mm	
Offset fémoral	38 mm	40 mm	
Longueur col	48 mm	54 mm	
Angle cervico-diaphysaire (CC'D)	130°	132°	
<b>Genou (4)</b>			
	<b>Droit</b>	<b>Gauche</b>	
Valgus/Varus	Valgus 3°	Varus 0°	
Flessum/Recurvatum	Recurv. 5°	Recurv. 7°	
Angle fémoral mécanique	93°	92°	
Angle tibial mécanique	90°	89°	
HKS	4°	4°	
<b>Torsions</b>			
	<b>Droit</b>	<b>Gauche</b>	
Torsion fémorale	37°	33°	
Torsion tibiale	41°	32°	
Rotation fémoro-tibiale	-1°	10°	

Figure 26 : Exemples de rapport SterEOS® pour l'étude des membres inférieurs.

### C. Paramètres étudiés

Le balayage étant réalisé sur la totalité des membres inférieurs, les reconstructions 3D permettaient une étude des paramètres des 2 membres inférieurs, que le patient ait un pied plat uni ou bilatéral. Lorsqu'un patient présentait un pied plat unilatéral, nous avons préféré ne pas séparer les données droites et

gauches et donc décidé d'inclure dans nos données statistiques les paramètres relevés sur les deux membres (homolatéral et controlatéral au pied plat).

### **Mesures de longueur (cf. figure 27) :**

- *La longueur totale* est la distance séparant le point le plus haut de la tête fémorale du point le plus bas du tibia, au milieu de la mortaise du talus.

- *La longueur fémorale* est la distance séparant le point le plus haut de la tête fémorale du point le plus bas du condyle fémoral médial.

- *La longueur tibiale* se mesure depuis le milieu de l'éminence intercondyloire jusqu'au milieu de l'interligne tibio-talaire.

### **Paramètres de hanche :**

- *l'offset fémoral* est la distance entre l'axe diaphysaire du fémur et le centre de la tête fémorale. Il mesure en moyenne 41 à 44 mm et augmente avec la taille du fémur (48). Ce paramètre est surtout utile dans le bilan pré-opératoire d'une arthroplastie de hanche.

- *l'angle cervico-diaphysaire* est l'angle défini par l'axe du col fémoral et la diaphyse fémorale, normalement compris entre 135 et 140°.

### **Paramètres de genou (cf. figure 27) :**

- *Les axes mécaniques :*

Ils sont à différencier des axes anatomiques car ils connectent les centres de chaque articulation. L'axe mécanique fémoral relie le centre de la tête fémorale au sommet de l'échancrure intercondyloire ; l'axe mécanique tibial relie le milieu du segment séparant les épines tibiales au milieu de la mortaise tibio-talaire. Physiologiquement, les axes mécaniques du fémur et du tibia ne sont pas alignés et forment un angle en

varus de 1,2°. L'axe mécanique du membre inférieur est la droite unissant le centre de la tête fémorale au milieu du plafond de la mortaise tibio-talaire. Physiologiquement, celui-ci coupe l'articulation du genou à environ 5 mm en dedans du centre de l'articulation, à travers l'épine tibiale médiale. La déviation latérale ou médiale de cet axe de charge permet de caractériser une déformation respectivement en valgus ou en varus.

- *Les angles mécaniques :*

Lorsqu'il existe une déformation du membre inférieur dans le plan frontal (varus ou valgus), il est important de déterminer si la déviation est localisée au fémur ou au tibia, et cette localisation repose sur la mesure des angles mécaniques. Encore appelés angles mL DFA (*mechanical lateral distal femoral angle*) et MPTA (*medial proximal tibial angle*), ils sont définis par l'angulation entre les lignes articulaires fémorale ou tibiale du genou et leur axe mécanique associé. La déviation de ces angles par rapport aux valeurs normales (85°-90°) permet de reconnaître le siège de la déformation (49).

- *L'angle HKS (= Hip-Knee-Shaft)* correspond à l'angle anatomique fémoral et mesure 6°. Il correspond à l'angle défini par les axes anatomique et mécanique du fémur. Ce paramètre est utilisé dans le bilan pré-opératoire des arthroplasties totales de genou.

- *La déformation dans le plan frontal (varus/valgus)* correspond à l'angle formé par les axes mécaniques du fémur et du tibia en regard du genou, et permet d'apprécier le degré de genu valgum ou varum. Les valeurs du genu valgum physiologique sont voisines de 2° chez l'homme et 3-4° chez la femme.

- *La déformation dans le plan sagittal (flessum/récurvatum)* correspond à l'angle ouvert en avant, entre l'axe mécanique du fémur et la perpendiculaire à l'axe

tibial au niveau des plateaux tibiaux, et permet d'évaluer le degré de flectum ou récurvatum. Ce dernier normalement n'excède pas  $96^{\circ}$ (40).

**Mesures de torsion (cf. figure 27) :**

- *La torsion fémorale* est définie par l'angle dièdre que forment entre eux le plan vertical contenant l'axe transversal de l'extrémité supérieure du fémur et le plan vertical bicondylien. Valeur normale à l'âge adulte =  $14 \pm 7^{\circ}$  (1).

- *La torsion tibiale* est définie par l'angle entre la tangente à la partie postérieure de l'épiphyse tibiale proximale et l'axe bimalléolaire. Valeur moyenne à l'âge adulte =  $20^{\circ}$ .

- *La rotation fémoro-tibiale* est définie par l'angle entre le plan bicondylien et le plan des plateaux tibiaux. Elle est de  $3^{\circ}$  en moyenne (rotation externe) (1, 32).



Figure 27: Repères et constructions permettant les mesures de longueur et les mesures de déviation angulaire des différents segments des membres inférieurs.

1 : longueur totale; 2 : longueur fémorale; 3 : longueur tibiale; 4 : axe fémoral mécanique ;  
 5 : axe tibial mécanique; 6 : angle fémoral mécanique; 7: angle tibial mécanique; 8: angle HKS;  
 9 : déformation frontale (varus-valgus); 10 : déformation sagittale (flessum-récurvatum).

#### **4) calculs statistiques**

Un test t de Student pour comparaison entre deux groupes avec échantillons non-appariés a été appliqué au groupe témoin ainsi qu'aux patients.

# RÉSULTATS

## I. BILAN RADIOGRAPHIQUE

### A. Groupe patients

Vingt-quatre adultes (12 femmes et 12 hommes) ont été inclus de façon prospective dans l'étude. L'âge moyen était de 40 ans (minimum = 16 ans ; maximum = 79 ans). Sept patients présentaient un pied plat bilatéral ; 17 présentaient un pied plat unilatéral (11 pieds gauches ; 6 pieds droits). Au total, 31 pieds plats primitifs ont été analysés sur les radiographies standards et 48 membres inférieurs sur les reconstructions EOS<sup>®</sup>. Les principaux résultats sont rapportés dans le tableau 7.

- L'angle moyen de Djian-Annonier était de 142.4° [131°- 160°].

- Un valgus de l'arrière-pied était présent dans 77.4% des cas (retrouvé sur 24 pieds), et dans 100% des cas chez les patients ayant un pied plat bilatéral. Il mesurait en moyenne 10.8° [0°-25°] dans l'ensemble de la population étudiée.

- La divergence talo-calcanéenne était augmentée chez 1 seul patient (DTC= 54°), soit dans 4% des cas (les 29 autres patients présentaient un angle de divergence talo-calcanéenne normal ou diminué). La valeur moyenne de la divergence talo-calcanéenne était de 32.2° [11°-54°].

- Vingt-trois patients présentaient un équinisme (soit 96% de notre population totale), retrouvé de façon bilatérale chez 4 patients sur les 7 porteurs d'un pied plat bilatéral, soit dans 57% des cas.

- Des remaniements dégénératifs étaient radiographiquement visibles dans la majorité des cas (54 %). Aucun patient ne présentait de synostose sur les radiographies.

## **B. Groupe témoins**

Trente adultes (14 femmes et 16 hommes) ont été inclus, appariés en sexe aux patients. Afin de se superposer au maximum au groupe des patients, ils ont été également appariés en âge par tranche de 5 ans. L'âge moyen était de 40.6 ans (minimum= 20 ans ; maximum = 75 ans). Comme précisé dans le paragraphe sus-jacent, aucun témoin ne présentait de pied plat clinique et radiographique. Afin de limiter l'irradiation chez cette population saine et volontaire, il a été décidé de ne réaliser le bilan radiographique que d'un seul côté. Pour se rapprocher le plus possible de la population de patients, le côté fut également apparié; ainsi 13 pieds droits et 18 pieds gauches ont été analysés. Pour la tranche d'âge 16-20 ans, un seul témoin a pu être recruté ; le bilan radiologique a donc été effectué aux 2 pieds. Au total, 31 pieds ont été analysés (13 droits et 18 gauches) sur les radiographies et 60 membres inférieurs sur les reconstructions EOS<sup>®</sup>. Les principaux résultats sont rapportés dans le tableau 7.

- L'angle moyen de Djan-Annonier était de 123.7° [116°- 130°].
- Trois témoins (soit 10% de la population témoin) présentaient un valgus de l'arrière-pied, mesuré à 10° chacun.
- La valeur moyenne de la divergence talo-calcaneenne était de 41° [26°-56°] pour l'ensemble de la population. Un seul témoin présentait une divergence talo-calcaneenne augmentée, mesurée à 56°.

- Trois témoins présentaient un équinsisme (soit 10% de notre population témoin). L'angle talo-crural moyen pour l'ensemble de la population témoin était de 106° [92°-119°].

		AGE	DJIAN	VALGUS	DTC	EQUINISME
			N = 120-130°	N = 3-5°	N = 30-50°	N = 105-110°
PIED PLAT	Moy	40,2	142,4	10,8	32,2	109
	Max	79	160	25	54	130
	Min	16	131	0	11	86
TEMOIN	Moy	40,6	123,7	1,1	41,1	106
	Max	75	130	10	56	119
	Min	20	116	0	26	92

Tableau 7: Résultats des différentes mesures sur radiographies standards de la population pied plat et population témoin.

## II. BILAN EOS®

Le balayage se faisant sur les 2 membres inférieurs, 48 membres inférieurs ont été analysés sur les reconstructions EOS® pour la population "pied plat" et 60 membres inférieurs pour la population témoin. Les principaux résultats sont rapportés dans le tableau 8. Aucune différence significative n'a été mise en évidence en ce qui concerne les longueurs fémorales, tibiales, et totales des membres inférieurs entre les patients et les témoins. Les moyennes étaient respectivement pour le groupe pied plat et pour le groupe témoin de 43.2 cm et 43.4 cm pour la longueur fémorale ( $p=0.81$ ), 37.3 cm et 37.3 cm pour la longueur tibiale ( $p=1.00$ ) ; et 81 cm et 81.3 cm pour la longueur totale ( $p=0.84$ ).

Aucune déformation n'a été retrouvée dans les plans frontal et sagittal chez les patients et chez les témoins (absence de varus/valgus, flessum ou récurvatum).

Les résultats montrent également qu'il n'existait pas de différence significative entre les 2 groupes en ce qui concerne les mesures de torsion des membres inférieurs ( $p = 0.52$  pour la torsion fémorale,  $p = 0.69$  pour la torsion tibiale et  $p = 0.12$  pour la rotation fémoro-tibiale).

Une différence significative ( $p = 0.001$ ) pour la mesure de l'angle cervico-diaphysaire apparaissait entre les deux groupes, avec une tendance à la *coxa vara* (augmentation de l'angle cervico-diaphysaire) dans le groupe patients (angle moyen =  $125.1^\circ$ , écart-type =  $5.1$  ; [ $115.3^\circ$ - $137^\circ$ ]), par comparaison aux sujets témoins (angle moyen =  $128.1^\circ$ , écart-type =  $4.3$  ; [ $119.1^\circ$ - $138.8^\circ$ ]).

Deux autres différences étaient également significatives entre les deux groupes : les angles tibial mécanique et HKS apparaissaient plus importants chez les patients (angle tibial mécanique moyen =  $88.6^\circ$  avec un écart-type de  $2.7$  [ $82.5^\circ$ - $92.9^\circ$ ]; angle HKS moyen =  $5.3^\circ$  [ $1.8^\circ$ - $8^\circ$ ]) que chez les témoins (angle tibial mécanique moyen =  $87.2^\circ$  avec un écart-type de  $2.4$  [ $82.8^\circ$ - $92.5^\circ$ ]; angle HKS moyen =  $4.6^\circ$  [ $2.2^\circ$ - $10.3^\circ$ ]).

		LONGUEUR			HANCHE			
		Longueur fémur (cm)	Longueur tibia (cm)	Longueur totale (cm)	Diamètre tête fémorale (cm)	Offset fémoral (mm)	Longueur col (cm)	Angle cervico-diaphysaire (°)
<b>PIED PLAT</b>	Moy	43,2	37,3	81,0	45,8	43,7	52,9	125,1
	Écart-type	3,9	3,7	7,6	4,1	5,1	5,2	5,1
	Max	51,3	46,4	98,3	53,5	59,2	70,8	137,0
	Min	35,6	31,2	67,5	37,6	33,8	47,1	115,3
<b>TEMOIN</b>	Moy	43,4	37,3	81,3	45,5	42,0	52,7	128,1
	Écart-type	2,7	2,5	5,1	3,4	5,8	5,2	4,3
	Max	48,5	41,4	90,7	52,6	54,2	62,6	138,8
	Min	37,8	32,7	71,2	38,9	30,8	41,9	119,1
<b>p</b>		0,81	1,00	0,84	0,74	0,11	0,82	<b>0,001</b>

		GENOU					TORSION		
		Varus/Valgus (°)	Flessum Recurvatum(°)	Angle fémoral mécanique (°)	Angle tibial mécanique (°)	HKS(°)	Torsion fémorale (°)	Torsion tibiale (°)	Rotation fémoro-tibiale (°)
<b>PIED PLAT</b>	Moy	0,0	-0,8	92,4	88,6	5,3	13,0	31,3	-0,1
	Écart-type	4,0	6,9	1,9	2,7	1,2	9,2	8,0	6,8
	Max	5,2	20,8	95,8	92,9	8,0	29,8	48,5	15,1
	Min	-13,3	-14,3	88,3	82,5	1,8	-3,9	9,6	-12,6
<b>TEMOIN</b>	Moy	-1,2	-0,1	92,7	87,2	4,6	14,1	31,9	1,9
	Écart-type	2,3	5,6	2,1	2,4	1,4	8,3	8,5	6,6
	Max	2,8	18,0	96,6	92,5	10,3	34,1	48,7	17,2
	Min	-7,5	-11,4	86,7	82,8	2,2	-3,8	8,0	-18,5
<b>p</b>		0,10	0,57	0,45	<b>0,007</b>	<b>0,005</b>	0,52	0,69	0,12

Tableau 8: Résultats des différents paramètres calculés par le logiciel SterEOS® pour la population pied plat et la population témoin.

## DISCUSSION

### I. BUT DE L'ÉTUDE

Notre étude concerne des patients porteurs d'un pied plat symptomatique. Même si cette déformation de l'arrière-pied a engendré beaucoup d'articles, travaux, et mises au point, notre étude reste originale dans la mesure où nous n'avons pas retrouvé d'étude similaire chez l'adulte. En outre, les relations éventuelles entre un pied plat symptomatique et des troubles de torsion associés du membre inférieur homolatéral ne sont pas connues chez l'adulte et n'ont jamais été explorées.

### II. MÉTHODOLOGIE

Notre travail est une étude prospective concernant des patients adressés en consultation chirurgicale pour pied plat symptomatique. Notre étude présente peu de biais de sélection car tous les patients étaient sélectionnés par des chirurgiens spécialistes du pied. Nous nous sommes intéressés à une population variée pour limiter le biais de recrutement : population à la fois jeune et vieillissante dont les âges s'étendent de 16 à 79 ans. Cette population n'est cependant pas représentative de la population générale (car la grande majorité des personnes présentant un pied plat ne présentera aucun symptôme au cours de leur existence (4)), mais représentative d'une population de pieds plats symptomatiques. En effet, la plupart des patients

sélectionnés présentent des pieds plats dans des formes sévères parfois handicapantes, avec chez certains des remaniements dégénératifs des différents interlignes articulaires du pied (tibio-talaire, talo-naviculaire) plus ou moins évolués, motivant leur consultation avec un chirurgien spécialiste en CHRU. L'échantillon étudié était cependant limité en nombre (24 patients/31 pieds pathologiques) mais suffisant pour permettre une étude statistique comparative.

Nous avons décidé de ne pas considérer le nombre de patients mais le nombre de pieds plats car dans notre étude, la majorité des pieds plats étaient unilatéraux, et avons choisi d'apparier en conséquence chaque pied plat à un pied sain témoin.

Pour l'étude pangonographique sur EOS<sup>®</sup>, nous avons préféré ne pas séparer les données droite/gauche des membres inférieurs lorsqu'un patient présentait un pied plat unilatéral, et donc, avons décidé d'inclure dans nos données statistiques les paramètres relevés sur les deux membres : homolatéral et controlatéral au pied plat. En effet, aucune étude dans la littérature n'a montré si un pied plat unilatéral engendrait des troubles de torsion du membre homolatéral ou des troubles de statique globale.

Les biais de sélection ont été également minimisés pour le recrutement des témoins car ceux-ci ont été appariés en âge et en sexe à notre groupe de pieds plats.

Concernant les biais de mesures, ces derniers étaient quasi nuls car les manipulateurs qui effectuaient les reconstructions 3D des pangonométrie EOS<sup>®</sup> ont reçu une formation dédiée par la firme Biospace Imaging et une double lecture était faite par l'ingénieur d'application Biospace Imaging, sans savoir s'il s'agissait d'un patient ou d'un témoin.

### III. RÉSULTATS

Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre le groupe « pied plat » et les sujets témoins en ce qui concerne les longueurs fémorale, tibiale, et la longueur totale des membres inférieurs. Aucune déformation n'a été retrouvée dans les plans frontal et sagittal chez les patients et chez les témoins. Les résultats montrent également qu'il n'existe pas de différence significative entre les 2 groupes en ce qui concerne les mesures de torsion des membres inférieurs. Ainsi, sous réserve d'un petit échantillon de patients, l'ensemble de ces paramètres n'interviendrait pas dans la physiopathologie du pied plat. Notre étude permet ainsi de confirmer les suppositions cliniques des chirurgiens spécialisés dans ce domaine.

Aucun trouble de la statique dans le plan frontal (absence de varus/valgus) des membres inférieurs n'est retrouvé de façon significative dans notre étude, ce qui sous-entendrait que le valgus de l'arrière-pied, l'une des trois composante du pied plat, n'engendre aucun trouble torsionnel sur l'axe jambier.

Deux paramètres semblent néanmoins se dégager de notre série : l'angle tibial mécanique et l'angle HKS qui apparaissent plus importants dans la population pied plat que dans la population témoin. L'angle HKS est surtout utile dans les bilans préopératoires d'arthroplastie totale de genou en vue du choix de l'implant le plus approprié (50). Ce paramètre a donc peu de valeur dans notre population car celle-ci est composée de patients qui ne bénéficieront pas d'une prise en charge opératoire. L'angle tibial mécanique est utile uniquement lorsqu'il existe une déformation du membre inférieur dans le plan frontal (varus ou valgus). Il permet ainsi de déterminer la localisation de la déviation : au tibia (en cas de majoration de l'angle tibial mécanique) ou au fémur (en cas d'angle tibial mécanique normal mais d'angle

fémoral mécanique augmenté). En l'absence de déviation dans le plan frontal, ce paramètre n'a pas non plus de signification pathologique particulière.

Concernant les paramètres de la hanche, il existe une grande variabilité dans la population pour la mesure de l'offset fémoral, et Krishnan et al. ont démontré qu'il n'était corrélé à aucune caractéristique anatomique (51).

Il n'existe pas de différence significative entre les 2 groupes en ce qui concerne les mesures de torsion des membres inférieurs, du moins dans une population adulte. À l'inverse, chez l'enfant présentant un pied plat, l'augmentation de la torsion fémorale est le plus fréquent des troubles de torsion. Dans 50% des cas environ, le trouble de torsion global disparaît malgré la persistance de l'anomalie architecturale fémorale, grâce à une hypertorsion tibiale externe compensatrice. Dans la littérature (52-54), des anomalies de torsion ont été décrites chez l'enfant porteur d'un pied plat : les 2 paramètres qui différaient avec une population pédiatrique normale sont la torsion fémorale et la torsion tibiale externe. En 2008, Zafiropoulos a montré qu'il existait une relation positive entre pied plat et antéversion fémorale dans une étude portant sur 569 enfants âgés de 3 à 6 ans (52). Ainsi, cliniquement, tous les enfants porteurs d'un pied plat présentaient une augmentation exagérée de la rotation médiale de la hanche, paramètre indirect témoignant d'une antéversion fémorale pathologique. Sur le plan dynamique, Twomey et McIntosh, en recherchant les conséquences du pied plat sur la marche, retrouvaient une rotation externe de hanche (6-7°) et un angle du pas augmentés de façon significative dans le groupe pied plat, seules différences entre les témoins sains et les porteurs d'un pied plat (53). Enfin en 2012, Glard (54) a montré qu'il existait une corrélation négative entre l'antéversion fémorale et la torsion tibiale dans la population générale pédiatrique et, qu'ainsi, les grandes antéversions fémorales sont généralement associées à des torsions tibiales externes, indépendamment de l'âge. Ces

paramètres n'ont jamais été évalués chez l'adulte. Notre étude est donc originale sur ce point, même si ces paramètres ne diffèrent pas de manière significative entre les patients et les témoins.

Le dernier paramètre étudié dans le cadre des torsions des membres inférieurs est la rotation fémoro-tibiale. Ce paramètre ne ressortait pas non plus dans notre étude.

## **IV. PERSPECTIVES : EOS<sup>®</sup>**

### **A. Bilan du pied plat et EOS<sup>®</sup>**

Il a été décidé pour cette étude de réaliser le bilan radiographique du pied plat sur radiographies standards car ce bilan est parfaitement codifié, effectué en collaboration avec la consultation d'orthopédie et les chirurgiens orthopédistes. Sutter a comparé dans une étude récente les différents angles de l'arrière-pied mesurés sur EOS<sup>®</sup> avec ceux mesurés sur les radiographies standards (53). Il a montré qu'il n'existait pas de différence significative entre les 2 modalités d'imagerie (55). Il apparaît donc licite d'imaginer que le bilan radiographique du pied plat puisse être réalisé sur EOS<sup>®</sup>, avec évaluation complémentaire systématique des membres inférieurs, compte-tenu de la faible dose de rayonnement délivrée. Une étude à plus grande échelle permettrait peut-être d'objectiver d'éventuels troubles statiques ou de torsion des membres inférieurs. Comme vu précédemment, le bilan standard d'un pied plat comporte des clichés réalisés en charge : incidence de profil et incidence

dorso-plantaire en incidence bifocale. Le cliché de profil en charge pour l'étude de l'effondrement de l'arche médiale est aisément réalisable sur EOS<sup>®</sup>. En revanche, le cliché dorso-plantaire réalisé pour l'étude de l'abduction de l'avant-pied et la mesure de l'angle de couverture de la tête du talus n'est pas réalisable sur le système EOS<sup>®</sup>, ce dernier permettant seulement d'obtenir des clichés orthogonaux, avec un faisceau de rayons X horizontal, d'inclinaison non modifiable. Or, en radiographie standard, cette incidence est réalisée pied à plat avec un rayon directeur incliné de 15° vers la tête dans le plan sagittal et un centrage effectué sur le milieu du 2<sup>ème</sup> métatarsien. Le système EOS<sup>®</sup> est donc insuffisant pour une étude radiographique optimale dans la prise en charge d'un pied plat. En effet, l'étude de l'abduction de l'avant-pied est primordiale pour le choix thérapeutique chirurgical.

## **B. Bilan des troubles de torsion des membres inférieurs et EOS<sup>®</sup>**

Concernant les moyens d'analyse des troubles statiques des membres inférieurs, l'examen le plus souvent pratiqué est le scanner. Il est considéré comme fiable avec des mesures reproductibles car parfaitement codifiées. Cependant, malgré de nouvelles techniques d'acquisition dites "low-doses" (scanners de dernière génération avec reconstructions itératives), cette méthode reste irradiante et pose donc le problème du suivi des troubles de torsion, en particulier dans la population pédiatrique. De plus, chez l'adulte, la présence de matériel prothétique (hanche, genou) est responsable d'artéfacts scanographiques pouvant rendre difficile le positionnement précis des repères nécessaires aux mesures de longueurs et de déviations angulaires des membres inférieurs (par exemple, les points de repères

des plateaux tibiaux en cas de prothèse de genou) et donc, donner des résultats moins fiables. En outre, l'examen tomodensitométrique étant réalisé en décharge, la posture globale de l'individu, les coaptations articulaires et les contraintes de position du bassin font que l'on n'obtient qu'une idée de la rotation globale du membre inférieur.

Par comparaison au scanner, le système d'imagerie EOS<sup>®</sup> permet de réaliser simultanément deux images radiographiques orthogonales (face et profil) en position fonctionnelle debout, de la tête aux pieds, à très faible dose d'irradiation, puis d'obtenir par modélisation une reconstruction 3D des éléments du squelette. Dans une étude récente, Folinais et al. ont montré qu'il n'existait pas de différence significative entre les mesures de torsion réalisées au scanner et les mêmes mesures réalisées avec l'EOS<sup>®</sup> (56). L'examen se faisant en charge et les paramètres sagittaux et frontaux étant obtenus en même temps, le système EOS<sup>®</sup> pourrait donc être considéré désormais comme le "gold standard" dans l'analyse rotationnelle des membres inférieurs, sous réserve de sa disponibilité.

## CONCLUSION

Le pied plat est une pathologie fréquemment rencontrée dans les populations adultes et pédiatriques. Il est caractérisé par la faillite des moyens d'amortissement du pied lors de la marche. Plusieurs déformations sont intriquées de façon plus ou moins sévère : affaissement de l'arche médiale du pied, valgus de l'arrière-pied, abduction et supination de l'avant pied. Des relations éventuelles entre l'existence d'un pied plat primitif et des troubles de torsion des membres inférieurs ont été évoquées chez l'enfant mais aucune étude n'avait été réalisée à ce jour chez l'adulte.

Le système EOS<sup>®</sup> est une technologie récente et innovante qui permet de réaliser des reconstructions 3D des membres inférieurs en charge, de manière peu irradiante, et d'obtenir entre autres des mesures précises de torsion des membres inférieurs dérivées de ces reconstructions.

Notre étude prospective, réalisée chez des patients adultes porteurs d'un pied plat sévère et symptomatique et chez des sujets témoins appariés en âge et en sexe, a permis de montrer qu'il n'existait pas de troubles de torsion notables chez ces patients.

Au terme de notre étude, il aurait été éventuellement licite de proposer à l'avenir une évaluation systématique du pied plat et des membres inférieurs sur le système EOS<sup>®</sup> afin de vérifier la pertinence de nos résultats sur une population plus vaste. Cependant, l'étude de l'abduction de l'avant-pied, fondamentale pour une éventuelle prise en charge opératoire, n'est pas réalisable sur le système EOS<sup>®</sup> car son faisceau de rayons X est horizontal et non inclinable.

Un bilan pangonométrique sur le système EOS<sup>®</sup> n'apparaît donc pas nécessaire pour une étude radiographique optimale dans la prise en charge thérapeutique du pied plat de l'adulte.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. JL.Lerat, G.Taussig. Les anomalies de rotation des membres inférieurs. Rev Chir Orthop. 1982(68: 1-74).
2. Dubousset J, Charpak G, Skalli W, de Guise J, Kalifa G, Wicart P. Modélisation vertébrale et squelettique par le système EOS. Archives de Pédiatrie. 2008;15:665-6.
3. Dubousset J, Charpak G, Skalli W, Kalifa G, Lazennec JY. Système EOS : la radiographie de la tête aux pieds face et profil simultanés à très basses doses de radiations: Un nouveau regard pour l'orthopédie. Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur. 2007;93:141-3.
4. Piat, Allain. Pied plat valgus. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Podologie. 2000(27-060-A-10):7 p.
5. Cahuzac J, Lechevallier J. troubles de la démarche et boiterie. Polycopié national de pédiatrie - Université Paris V.
6. Cotten A. Imagerie musculosquelettique Pathologies locorégionales. Masson,.
7. Maynou CN, S. Staquet, V. Parent, S. Boniface, O. Pied plat valgus statique de l'adulte (y compris synostose congénitales). EMC (Elsevier Masson SAS, Paris). 2010; Appareil locomoteur(14-110-A-10).
8. Spacek E. Quand les pieds sont à plats, faut-il les remonter? Le médecin du Quebec. avril 2009;44.
9. Deland JT, Arnoczky SP, Thompson FM. Adult acquired flatfoot deformity at the talonavicular joint: reconstruction of the spring ligament in an in vitro model. Foot & ankle. 1992;13:327-32.
10. Huang CK, Kitaoka HB, An KN, Chao EY. Biomechanical evaluation of longitudinal arch stability. Foot & ankle. 1993;14:353-7.
11. Kitaoka HB, Ahn TK, Luo ZP, An KN. Stability of the arch of the foot. Foot & ankle international / American Orthopaedic Foot and Ankle Society [and] Swiss Foot and Ankle Society. 1997;18:644-8.
12. Toullec E. Pied plat de l'adulte. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris). 2012;Podologie(27-060-A-10).
13. Kohls-Gatzoulis J, Angel J, Singh D. Tibialis posterior dysfunction as a cause of flatfeet in elderly patients. The Foot. 2004;14:207-9.
14. Isikan UE. The values of talonavicular angles in patients with pes planus. The Journal of foot and ankle surgery : official publication of the American College of Foot and Ankle Surgeons. 1993;32:514-6.
15. Johnson KA. Tibialis posterior tendon rupture. Clinical orthopaedics and related research. 1983(177):140-7.
16. Myerson MS. Adult acquired flatfoot deformity: treatment of dysfunction of the posterior tibial tendon. Instructional course lectures. 1997;46:393-405. Epub 1997/01/01.
17. Hintermann B, Gachter A. The first metatarsal rise sign: a simple, sensitive sign of tibialis posterior tendon dysfunction. Foot & ankle international / American Orthopaedic Foot and Ankle Society [and] Swiss Foot and Ankle Society. 1996;17:236-41.
18. Zing E. Examen clinique élémentaire en podologie. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Podologie. 2008:27-030-A-05.

19. Pellas F, Vial D. Etude des empreintes et pressions plantaires: données actuelles Le pied en rhumatologie. Springer-Verlag, editor1998.
20. Toullec E, Barouk LS. Interet de la baropodométrie dynamique dans l'analyse de la chirurgie du pied plat valgus de l'adulte. *Med Chir Pied* 2004;20(17-22).
21. Toullec E, Pfliger F. Baropodométrie. In: Seringe R, Besse J-L, Wicart P, editors. *Les grandes déformations du pied de l'enfant et de l'adulte*. Paris: Elsevier Masson; 2010. p. 63-7.
22. Bluman EM, Title CI, Myerson MS. Posterior tibial tendon rupture: a refined classification system. *Foot and ankle clinics*. 2007;12:233-49, v.
23. Cotten A. L'imagerie. Symposium. Les pieds plats valgus. Monographie AFCP n°6. Montpellier. Sauramps Médical. 2010:p55-61.
24. Wapner KL, Chao W. Nonoperative treatment of posterior tibial tendon dysfunction. *Clinical orthopaedics and related research*. 1999(365):39-45.
25. Wenger DR, Mauldin D, Speck G, Morgan D, Lieber RL. Corrective shoes and inserts as treatment for flexible flatfoot in infants and children. *The Journal of bone and joint surgery American volume*. 1989;71(6):800-10.
26. Biga N, Mouliès D, Mabit C. Pied plat valgus statique (y compris les synostoses congénitales). *EMC Appareil locomoteur*. 1999;14-110-A-10.
27. Kelly IP, Easley ME. Treatment of stage 3 adult acquired flatfoot. *Foot and ankle clinics*. 2001;6:153-66.
28. Kelly IP, Nunley JA. Treatment of stage 4 adult acquired flatfoot. *Foot and ankle clinics*. 2001;6:167-78.
29. Accadbled F. MC, Cahuzac J.-P. Anomalies rotationnelles des membres inférieurs chez l'enfant. *EMC (Elsevier Masson SAS, Paris)*. 2007; Appareil locomoteur:15-320.
30. Caton J, Falaise C et Ait Si Selmi T. Anomalies de torsion du squelette au membre inférieur. *EMC. (Elsevier Masson SAS, Paris)*. 2003;27-060-A-53:11p.
31. Cahuzac JP. Vices de torsion des membres inférieurs. *Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur*. 2006;92(4):395-7.
32. Duparc F. Troubles de torsion du squelette du membre inférieur de l'adulte. *EMC (Elsevier Masson SAS, Paris)*. 2009; Appareil locomoteur(15-322-A-10).
33. Taussig G. Les anomalies de rotation des membres inférieurs chez l'enfant. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*. 1995;8:131-6.
34. Cahuzac JP, Vardon D, Sales de Gauzy J. Development of the clinical tibiofemoral angle in normal adolescents. A study of 427 normal subjects from 10 to 16 years of age. *The Journal of bone and joint surgery British volume*. 1995;77:729-32.
35. Cahuzac JP, Vardon D, Sales de Gauzy J. Deformities of the lower limbs in the frontal plane in children. *Annales de pediatrie*. 1993;40(4):230-6.
36. Trimble MH, Bishop MD, Buckley BD, Fields LC, Rozea GD. The relationship between clinical measurements of lower extremity posture and tibial translation. *Clin Biomech*. 2002;17:286-90.
37. Tachdjian M. Torsional (or rotational) deformities of the lower limb. *Company WS, editor* 1990.

38. Tamari K, Tinley P, Briffa K, Bredahl W. Validity and reliability of existing and modified clinical methods of measuring femoral and tibiofibular torsion in healthy subjects: use of different reference axes may improve reliability. *Clin Anat.* 2005;18:46-55.
39. Yagi T. Tibial torsion in patients with medial-type osteoarthrotic knees. *Clinical orthopaedics and related research.* 1994(302):52-6.
40. Chateil J.-F. BM, Mary P., Vilette A. Troubles de la statique des membres inférieurs chez l'enfant, d'origine congénitale ou acquise (hanche exclue). EMC (Elsevier Masson SAS, Paris). 2008;Radiodiagnostic - Squelette normal - Neuroradiologie-Appareil locomoteur(31-106-A-10).
41. Gheno R, Nectoux E, Herbaux B, Baldisserotto M, Glock L, Cotten A, et al. Three-dimensional measurements of the lower extremity in children and adolescents using a low-dose biplanar X-ray device. *European radiology.* 2012;22:765-71.
42. Buck FM, Guggenberger R, Koch PP, Pfirrmann CW. Femoral and tibial torsion measurements with 3D models based on low-dose biplanar radiographs in comparison with standard CT measurements. *AJR American journal of roentgenology.* 2012;199:W607-12.
43. Losel S, Burgess-Milliron MJ, Micheli LJ, Edington CJ. A simplified technique for determining foot progression angle in children 4 to 16 years of age. *Journal of pediatric orthopedics.* 1996;16:570-4.
44. Seber S, Hazer B, Kose N, Gokturk E, Gunal I, Turgut A. Rotational profile of the lower extremity and foot progression angle: computerized tomographic examination of 50 male adults. *Archives of orthopaedic and trauma surgery.* 2000;120:255-8.
45. Charpak G. [Prospects for the use in medicine of new detectors of ionizing radiation]. *Bulletin de l'Academie nationale de medecine.* 1996;180:161-8; discussion 8-9. Les perspectives ouvertes, pour la medecine, par les nouveaux detecteurs de rayonnements ionisants.
46. Dubouset J, Charpak G, Dorion I, Skalli W, Lavaste F, Deguise J, et al. [A new 2D and 3D imaging approach to musculoskeletal physiology and pathology with low-dose radiation and the standing position: the EOS system]. *Bulletin de l'Academie nationale de medecine.* 2005;189:287-97; discussion 97-300. Une nouvelle imagerie osteo-articulaire basse dose en position debout: le systeme EOS.
47. Delin C, Silvera S, Radier C, Bassinet C, Rehel J-L, Djian P, et al. Dosimétrie des mesures de torsion et d'antéversion des membres inférieurs utilisant l'EOS et le scanner. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique.* 2011;97:S298.
48. Rubin PJ, Leyvraz PF, Aubaniac JM, Argenson JN, Esteve P, de Roguin B. The morphology of the proximal femur. A three-dimensional radiographic analysis. *The Journal of bone and joint surgery British volume.* 1992;74:28-32.
49. Strecker W. Analyse et planification des déformations adjacentes au genou. *Maitrise Orthopédique,*172 . 2008.
50. Schlatterer B, Suedhoff I, Bonnet X, Catonne Y, Maestro M, Skalli W. Skeletal landmarks for TKR implantations: Evaluation of their accuracy using EOS imaging acquisition system. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research.* 2009;95:2-11.

51. Krishnan SP, Carrington RW, Mohiyaddin S, Garlick N. Common misconceptions of normal hip joint relations on pelvic radiographs. *The Journal of arthroplasty*. 2006;21:409-12.
52. Zafiroopoulos G, Prasad KSRK, Kouboura T, Danis G. Flat foot and femoral anteversion in children - A prospective study. *The Foot*. 2009;19:50-4.
53. Twomey DM, McIntosh AS. The effects of low arched feet on lower limb gait kinematics in children. *Foot*. 2012;22:60-5.
54. Glard Y. Relation entre antéversion fémorale et torsion tibiale chez l'enfant : à propos de 1399 cas. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*. 2012;98:S298.
55. Sutter R, Pfirrmann CW, Espinosa N, Buck FM. Three-dimensional hindfoot alignment measurements based on biplanar radiographs: comparison with standard radiographic measurements. *Skeletal radiology*. 2013;42:493-8.
56. Folinais D, Thelen P, Delin C, Radier C, Catonne Y, Lazenec JY. Évaluation des variations torsionnelles du membre inférieur : système EOS versus scanner. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*. 2013;99:431-9.

**AUTEUR : Nom : CEBULSKI-DELEBARRE**

**Prénom : Aurélie**

**Date de Soutenance : Lundi 31 mars 2014**

**Titre de la Thèse : Utilisation du système EOS<sup>®</sup> dans la recherche de troubles de torsion des membres inférieurs chez des patients adultes souffrant d'un pied plat idiopathique symptomatique.**

**Thèse - Médecine - Lille 2014**

**Cadre de classement : Imagerie**

**DES + spécialité : DES de radiologie et Imagerie Médicale**

**Mots-clés : pied plat, trouble de torsion des membres inférieurs, EOS<sup>®</sup>**

**Résumé :**

Contexte : Le pied plat est une pathologie fréquemment rencontrée chez l'enfant comme chez l'adulte. Majoritairement asymptomatique, il est parfois responsable d'une symptomatologie douloureuse handicapante amenant le patient à consulter pour une prise en charge spécialisée, parfois chirurgicale. Des relations éventuelles entre pied plat et troubles de torsion des membres inférieurs ont été évoquées chez l'enfant, mais jamais chez l'adulte.

Méthodes : Vingt-quatre patients adultes (âge médian = 40 ans) ont été inclus de manière prospective dans notre étude, de septembre 2009 à mai 2012, à l'issue d'une consultation spécialisée en orthopédie du pied au CHRU de Lille. Chaque patient bénéficiait d'un bilan radiographique centré sur le pied pathologique et d'une pangenométrie des membres inférieurs sur EOS<sup>®</sup>. Sept pieds plats unilatéraux et 17 pieds plats bilatéraux ont été étudiés, soit 31 pieds pathologiques. Ces patients ont été comparés à des sujets témoins (n = 30), appariés en âge et en sexe. Un test statistique t de Student pour comparaison entre les 2 groupes a été utilisé.

Résultats : Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les 2 groupes concernant les mesures de torsion des membres inférieurs : torsion fémorale (p = 0.52), torsion tibiale (p = 0.69), et rotation fémoro-tibiale (p = 0.12). De manière identique, aucune différence significative n'a été objectivée entre les 2 groupes dans le plan frontal (varus/valgus) et dans le plan sagittal (flessum/récurvatum).

Conclusion : Notre étude a démontré qu'il n'existait pas de relation entre pied plat symptomatique et troubles de torsion des membres inférieurs chez l'adulte.

**Composition du Jury :**

**Présidente: Madame le Professeur Anne COTTEN**

**Asseseurs: Monsieur le Professeur Xavier DEMONDION  
Monsieur le Professeur Carlos MAYNOU**

**Directrice de Thèse: Madame le Professeur Nathalie BOUTRY**